

LA ALÚMINA EN COLOMBIA AÑO 2014

JUAN CAMILO CORREA ARANGO

SIMÓN GÓMEZ MESA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

LA ALÚMINA EN COLOMBIA AÑO 2014

JUAN CAMILO CORREA ARANGO

SIMÓN GÓMEZ MESA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

LA ALÚMINA EN COLOMBIA AÑO 2014

JUAN CAMILO CORREA ARANGO

SIMÓN GÓMEZ MESA

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico

Director

SANTIAGO BETANCOURT PARRA I.M. Ph.D

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

## DEDICATORIAS

*A nuestras familias por su apoyo incondicional...*

**Juan Camilo Correa Arango.**

**Simón Gómez Mesa.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín por la educación brindada durante nuestro pregrado que hoy se ve materializada en este trabajo de grado; también a todas las personas que durante nuestro proceso estuvieron presentes aportándonos todo su conocimiento y buena disposición.

Extendemos nuestro agradecimiento de manera especial a nuestro director Santiago Betancourt Parra, por prestarnos su apoyo, conocimiento y tiempo para orientarnos en la elaboración de este trabajo de grado.

## CONTENIDO

Objetivos.....	13
Justificación.....	14
Resumen.....	15
Introducción.....	16
CAPÍTULO 1. Generalidades de la alúmina .....	18
1.1 Contexto histórico .....	18
1.2 Óxido de aluminio.....	20
1.2.1 Nomenclatura .....	22
1.2.2 Estructura y morfología.....	22
1.2.3 Fases de la alúmina.....	25
CAPÍTULO 2. Proceso de obtención de la alúmina.....	27
2.1 Bauxita .....	27
2.1.1 Tipología de yacimientos de aluminio .....	28
2.1.2 Clasificación genética de las bauxitas .....	29
2.1.3 Distribución geológica y geográfica de las bauxitas a nivel mundial .....	32
2.2 Obtención de la alúmina.....	33
2.3 La Alúmina en el mundo.....	35

	7
2.4 Calidad (SGA) y Propiedades .....	37
CAPÍTULO 3. Impacto ambiental.....	38
3.1 Impacto ambiental mundial.....	38
3.2 Impacto ambiental nacional .....	41
CAPÍTULO 4. Aplicaciones a nivel mundial.....	44
4.1 Aplicaciones químicas, térmicas y ambientales.....	46
4.2 Aplicaciones médicas.....	51
4.3 Aplicaciones mecánicas .....	55
CAPÍTULO 5. Contexto nacional .....	57
5.1 Investigaciones previas y actuales .....	57
5.2 Exploración .....	65
5.3 Explotación y beneficio del mineral .....	66
5.4 Impacto económico .....	69
CAPÍTULO 6. Prospectiva de la alúmina en Colombia.....	73
CAPÍTULO 7. Conclusiones .....	75
Recomendaciones y trabajos futuros.....	77
Referencias.....	78

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Representación de reacción química. Tomado de [6].....	20
Gráfico 2. Estructura molecular del óxido de aluminio. Tomado de [6].....	20
Gráfico 3. Estructura de la $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . (a) Secuencia de apilamiento AaBbAcBaA (b) Plano basal presentando la subred aniónica hexagonal compacta y los cationes ocupando 2/3 de los intersticios octaédricos. Tomado de [8]. .....	23
Gráfico 4. Subred catiónica de la $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en la que se resalta la celda romboédrica. Tomado de [8].....	24
Gráfico 5. Diagrama térmico de las fases de transición de la alúmina. Tomado de [4] .....	25
Gráfico 6. Principales tipos de depósitos de Bauxitas kársticas. A) Tipo mediterráneo, B) Tipo Kazajstán, C) Tipo timan, D) Tipo ariège, E) Tipo tula. – 1. (Negro) Bauxita 2. Marga 3. Dolomita 4. Arcilla 5. Arcilla arenosa 6. Arena. Tomado y modificado de [11].....	31
Gráfico 7. Diagrama ternario de Schellman (1983) muestra la clasificación de “laterita”. Tomado y modificado de [15]. .....	31
Gráfico 8. Reservas de bauxitas a nivel mundial. Tomado de [16].....	32
Gráfico 9. Distribución de la minería de bauxitas a nivel mundial. Tomado de [17].....	33
Gráfico 10. Producción de alúmina por región. Tomado de [20].....	36
Gráfico 11. Problemática ambiental. Tomada de [22].....	38
Gráfico 12. Mapa hidrográfico de la zona afectada en Hungría. Tomado de [23] .....	39



Gráfico 13. Soldado húngaro vistiendo traje de protección química caminando en calles contaminadas con lodos en la ciudad de Devecser, Hungría. Tomado de [24] .....	40
Gráfico 14. Daño al ecosistema por contaminación de lodos rojos en Hungría. Tomado de [24].....	40
Gráfico 15. Fotografía aérea de contaminación con lodo rojo en población de Kolontar, Hungría. Tomada el 5/06/2010. Tomado de [24] .....	40
Gráfico 16. Fotografía aérea tomada el 05/06/2010 muestra la pared rota en el depósito de lodos rojos. Tomada de [24] .....	40
Gráfico 17. Reactor de Catálisis Heterogénea. Tomado de [28] .....	45
Gráfico 18. Implante y Sustituto Óseo. Tomado de [29].....	45
Gráfico 19. Ladrillo Refractario de Alta alúmina. Tomado de [30] .....	45
Gráfico 20. Cinta abrasiva de alúmina de circonio. Tomado de [31].....	45
Gráfico 21. Comparación de la adsorción de agua entre Sílica gel, Alúmina activada y 4A Zeolita. Adsorción Kg H <sub>2</sub> O/100 Kg vs. Presión de vapor de agua mm Hg. Tomado de [39].....	49
Gráfico 22. Deliquescent Air Dryer Van Air D-72. Secador de Aire Delicuescente. Tomado de [40].....	49
Gráfico 23. Pyro-Paint™ 634-AL AREMCO Recubrimiento refractario de alta temperatura base alúmina. Tomado de [41].....	49
Gráfico 24. Abrasivo de alúmina 98,5% para metalografía. Tomado de [42].....	49
Gráfico 25. Christy's CUSTOM-CRAFTED™ Hexagonal Target Tiles. Catalizador alta resistencia a la erosión 99,99% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Tomado de [43] .....	49

Gráfico 26. Bolas de alúmina para soportes de catalizadores petroquímicos e industria de fertilizantes XIETA®. Tomado de [44].	50
Gráfico 27. Piezas especiales de alúmina anti-desgaste XIETA® para todo tipo de industrias. Tomado de [45].	50
Gráfico 28. Prótesis dental fabricada en material cerámico. Tomado de [50].	52
Gráfico 29. Desgaste producido sobre acetábulos de polímero en prótesis de cadera. Tomado de [48].	54
Gráfico 30. Representación esquemática del desgaste acetábulo-cabeza femoral para las diferentes combinaciones de materiales. Tomado de [48].	54
Gráfico 31. Caso real rotura catastrófica implante alúmina. Tomado y modificado de [48].	55
Gráfico 32. Insertos cerámicos para corte de base alúmina. Tomado de [51].	56
Gráfico 33. Insertos cerámicos para corte de base alúmina Ti-C. Tomado de [52].	56
Gráfico 34:DRX de la bauxita nacional. Tomado de [56].	60
Gráfico 35: DRX de la bauxita importada. Tomado de [56].	60
Gráfico 36. Bauxita nacional. Tomado de [56].	61
Gráfico 37. Bauxita importada. Tomado de [56].	61
Gráfico 38. Composición química de los granos de gibbsita en la bauxita nacional. Tomado de [56].	62
Gráfico 39. Análisis Termogravimétrico de la bauxita nacional. Tomado y modificado de [56].	63
Gráfico 40. Análisis Termodiferencial bauxita nacional. Tomado y modificado de [56].	63

Gráfico 41. Muestra de bauxitas. A la izquierda (Yarumal, Antioquia) a la derecha (Santa rosa de Osos, Antioquia). Tomado de [62].....	67
Gráfico 42. Muestras de bauxitas. Izquierda (llanos de Cuivá, Yarumal, Antioquia) a la derecha (Guayana inglesa). Tomado de [62].....	68
Gráfico 43. Tiempo de respuesta en otorgamiento contrato de concesión. Tomado de [65]	68
Gráfico 44: Evolución del PIB minero desde 2000. Tomado de [68] .....	71
Gráfico 45: Composición del PIB minero. Tomado de [68].....	72

### LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Diversos nombres de la alúmina. Tomada de [7] .....	22
Tabla 2: Composición de yacimientos de alteración. Tomado de [7] .....	29
Tabla 3. Capacidad de producción de alúmina. Tomado de [20] .....	35
Tabla 4: Reservas de bauxita y producción de alúmina a nivel mundial. Tomado de [20]..	36
Tabla 5: Propiedades mecánicas de la $\alpha$ -alúmina. Tomado de [21] .....	37
Tabla 6: Propiedades eléctricas y térmicas de la $\alpha$ -alúmina. Tomado de [21] .....	37
Tabla 7: Otras propiedades importantes de la $\alpha$ -alúmina. Tomado de [21] .....	37
Tabla 8. Casos de daños ecológicos generados por lodos rojos. Tomado de [22].....	41
Tabla 9. Explotación de bauxita distrito 98 y 112. Tomado de [60] .....	66
Tabla 10. UPM con y sin título minero por región. Tomado de [63] .....	69
Tabla 11. Países exportadores de alúmina. Tomado y modificado de [67] .....	70
Tabla 12. Inversiones previstas en América Latina. Tomado de [66] .....	71

### LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación estequiométrica entre el Aluminio y el Oxígeno .....	20
---	----

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Exponer cuál es la condición de la alúmina en Colombia para el año 2014, abordando los temas de yacimientos, exploración, explotación, refinamiento, comercialización y usos, por medio de una exhaustiva revisión bibliográfica y de otras fuentes disponibles sobre el tema.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar e identificar las características y aplicaciones generales de la alúmina.
- Ilustrar la ubicación geológica y geográfica de la Bauxita en el mundo y Colombia con base en los estudios más actualizados disponibles.
- Exponer el estado del arte de la alúmina en Colombia en las diferentes fases del proceso: exploración, explotación, refinamiento, producción, comercialización y uso.
- Esbozar un escenario del desarrollo de la alúmina en Colombia.

## JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación fue desarrollado con el objeto de presentar el tema de la alúmina en el contexto colombiano para el año 2014. Tras la búsqueda bibliográfica para conocer la actualidad del material cerámico en el contexto nacional, se encontró poca información relevante, tanto en torno al material como sus aplicaciones y su comercialización, éste hecho motivó a la estructuración del presente trabajo.

La investigación busca abordar el tema de la alúmina incluyendo los aspectos principales y trata de manera específica algunos de ellos, con el fin de aportar elementos de estudio y proporcionar una compilación bibliográfica que podrá ser tenida en cuenta para futuras investigaciones en áreas relacionadas con los materiales cerámicos.

Asimismo, se realizó una investigación acerca del estado actual de la alúmina en Colombia que permitirá en un futuro tener una base más sólida para iniciar estudios en diferentes campos de la industria.

## RESUMEN

Con el presente trabajo se contextualiza al lector acerca de cuáles son las generalidades de este material, método de fabricación, aplicaciones y sobre todo, se muestra como se está realizando y cuál es el estado del método de obtención, las aplicaciones y el impacto ambiental en Colombia, sin dejar de lado el avance que se ha realizado en diferentes países que son potencias en la producción de alúmina y la explotación de bauxita, materia prima de la alúmina.

De manera puntual se trata el tema exploratorio y de posibles yacimientos de bauxita que existe en el país considerando las condiciones particulares de las regiones que sugieren dicha presencia del material y cuáles son las características sociales del entorno.

En la investigación de los estudios previamente realizados, se pudo observar que en Colombia hay regiones que sugieren posibles yacimientos para la explotación de la bauxita y por consiguiente para la producción de alúmina, sin embargo, en algunos de ellos, la explotación de la misma se está realizando de manera manual e ilegal por parte de los habitantes de estos lugares y con poca o nula participación de entidades gubernamentales para el control de dicha explotación.

Por último, se muestra a grandes rasgos, el impacto que han venido teniendo los materiales no metálicos en el comportamiento del PIB del país en los últimos años, lo cual brinda herramientas de análisis para proyectos futuros en investigación, desarrollo e implementación de nuevos materiales avanzados.

Palabras clave: Bauxita, Alúmina, Aplicaciones, Prospectiva en Colombia

## INTRODUCCIÓN

Los materiales cerámicos actualmente son clasificados de acuerdo a sus propiedades y aplicaciones, desde esta perspectiva se les divide en dos grandes grupos, los cerámicos tradicionales y los avanzados. La cerámica tradicional se refiere usualmente a las arcillas y sílice, mientras que la cerámica avanzada hace referencia a materiales con propiedades superiores como resistencia a la corrosión y estabilidad química, resistencia eléctrica y térmica o propiedades magnéticas, las cuales le permiten un sin número de aplicaciones en diferentes campos.[1].

Dentro de los cerámicos avanzados se puede ubicar la alúmina, material objeto de estudio del presente trabajo, el cual busca abordar aspectos fundamentales de exploración, explotación, producción, comercialización, aplicaciones e impacto ambiental. El trabajo esta dividió en los siguientes capítulos:

El capítulo 1 parte desde un contexto histórico de este material para luego abordar aspectos generales desde la ciencia de los materiales tales cómo composición, estructura y fases.

En el capítulo 2 el lector podrá encontrar información detallada acerca del proceso de obtención de la alúmina, desde la explotación del mineral obtenido a partir las minas de bauxita hasta el beneficio mediante el proceso Bayer.

El capítulo 3 aborda los impactos ambientales generados a partir de la explotación del mineral y se presentan diversos casos nacionales e internacionales de dicha problemática.

En el capítulo 4 se hace un recuento de los diversos usos tecnológicos en diferentes campos industriales como el químico, biomédico, ambiental, entre otros.

El capítulo 5 atiende los estudios realizados en Colombia en torno a este material, desde una perspectiva de exploración, explotación, beneficio e impacto económico.



Este trabajo finaliza con los capítulos 6 y 7, en los cuales se presenta una prospectiva de la alúmina en Colombia, y a la vez se exponen las conclusiones obtenidas a través de éste ejercicio académico.

## CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA ALÚMINA

En el presente capítulo se desarrollarán los elementos teóricos que se requieren para comprender y conocer las generalidades de la alúmina. Está conformado por secciones que van de lo general a lo particular, comenzando con la introducción al tema de la alúmina en su contexto histórico, generalidades, proceso productivo, tipos y características fisicoquímicas.

### 1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

En general los diferentes materiales alumínicos dentro de su composición química han tenido gran importancia en el desarrollo de los materiales cerámicos, como lo describe G. Paglia en su tesis doctoral; años anteriores al 5000 A.C las arcillas de aluminio se usaron para la elaboración de piezas cerámicas en la antigua Mesopotamia. Posteriormente para el periodo 3000 A.C los Babilonios y Egipcios comenzaron a utilizar compuestos de aluminio en diversas aplicaciones como perfumes, tintas y medicinas, mientras que los Romanos los emplearon para manufacturar cosméticos, y para el año 800 A.C durante la época Romana, la esmeralda, el zafiro y el rubí fueron usados en la joyería, las cuales son formas cristalinas de alúmina que obtienen su color por diversas impurezas [2].

La bauxita es el mineral de aluminio más común, descubierto en 1821 por Berthier cerca a *“the village of Les Baux”* en Francia y no fue hasta finales del siglo XIX cuando la bauxita se declaró como mineral compuesto de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{AlO.OH}$  y diversas cantidades de silicato de aluminio, dióxido de titanio e impurezas de mineral de hierro, de allí se han determinado varias formas cristalográficas de los hidróxidos de aluminio donde se incluye la gibbsita, bayerita, bohemita y diáspora, presentes en el mineral. Debido a un proceso químico natural, los hidróxidos de aluminio están presentes en la bauxita y es la alúmina  $\text{Al}_2\text{O}_3$  la más comúnmente producida, lo cual se consigue mediante el proceso Bayer, desarrollado en 1889 por Karl Bayer, el cual continúa siendo el tratamiento electrolítico más económico para la síntesis de la alúmina [2][3].

Sin embargo, se llegó a la conclusión que el aluminio fue separado en 1825 por Hans Christian Oersted inspirado en Plinio quien sin conocerlo, proporcionó la información necesaria para introducir el mundo de la alúmina y el aluminio. Se cuenta que durante el imperio romano el emperador Tiberio le pidió a un orfebre que fabricara y enseñara un plato hecho de un nuevo material. El plato que le fue enseñado era ligero y casi tan brillante como la plata. El orfebre dijo al emperador que la pieza había sido elaborada de arcilla y las únicas personas que conocían el proceso eran él y sus ayudantes. El emperador se interesó en el material, pero conociendo la pérdida de valor económico del oro y la plata que provocaría la producción de éste nuevo material, ordenó decapitar al orfebre [2].

De aquel relato se concluye que el metal era aluminio y la arcilla provenía de la mina de aluminio, posiblemente bauxita, de los actualmente conocidos depósitos cerca al norte del mediterráneo, una vez parte del antiguo imperio romano. La temeridad de Tiberio (42 A.C – 37 D.C) parece haber privado a la antigua Roma de un bien muy preciado para el comercio y al mundo de una larga historia en el uso de la alúmina. No obstante, no fue hasta el siglo XVIII y XIX que el mundo occidental comenzó a conocer y entender las diferentes áreas de la cultura romana, incluyendo la educación, la tecnología y la administración [2].

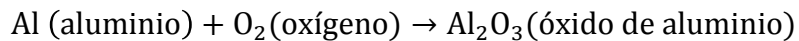
La alúmina ha tenido de alguna manera un uso diverso en el campo industrial y químico durante varios años. En el último siglo el tipo de mineral de alúmina más conocido y utilizado ha sido el “corindón” ( $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ ), sin embargo han surgido y ganado importancia diversos tipos de alúminas denominadas metaestables, las cuales son polimórficas y se reconocen por las letras griegas chi ( $\chi$ ), eta ( $\eta$ ), beta ( $\beta$ ), kappa ( $\kappa$ ), gamma ( $\gamma$ ), delta ( $\delta$ ), y theta( $\theta$ ) [2].

Las cerámicas de alúmina poseen excelentes propiedades fisicoquímicas gracias a su estructura atómica formada por enlaces híbridos iónicos y covalentes de gran estabilidad que otorgan propiedades como elevado punto de fusión, baja conductividad térmica, dureza, rigidez, e inercia y resistencia química que sumado a la disminución en los costos

de producción, presentan aplicabilidad en diversos campos y han sido objeto de numerosas investigaciones en las últimas décadas [4][5].

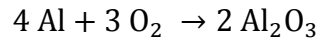
## 1.2 ÓXIDO DE ALUMINIO

El óxido de aluminio es un compuesto obtenido a partir de la reacción química entre el aluminio y el oxígeno, tradicionalmente referido como alúmina. En el Gráfico 1 se muestra la representación de la reacción química.



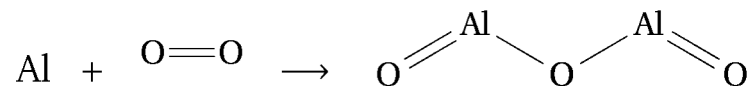
**Gráfico 1. Representación de reacción química. Tomado de [6]**

En la Ecuación 1 se muestra el balance estequiométrico de la reacción química.



**Ecuación 1. Ecuación estequiométrica entre el Aluminio y el Oxígeno**

La estructura molecular del óxido de aluminio se presenta en el Gráfico 2.



**Gráfico 2. Estructura molecular del óxido de aluminio. Tomado de [6]**

El óxido de aluminio es un material cerámico constituido por un material metálico y uno no metálico con textura granular y de color blanco tiza [7].

El óxido de aluminio de igual manera, es el único óxido de aluminio sólido con fórmula química  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y puede presentar diversas estructuras cristalinas, grado de hidratación e impurezas, siendo las de mayor uso cerámico la  $\alpha$ -alúmina, la  $\gamma$ -alúmina y el hidróxido de aluminio  $\gamma - \text{Al}(\text{OH})_3$ , compuestos obtenidos a partir de diferentes parámetros fijados durante el proceso de calcinación en el proceso Bayer. La fórmula natural de alúmina anhidra se denomina “corindón”, de estructura  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ . La alúmina alfa es la mejor

conocida y es el compuesto más significativo de la alúmina, sin embargo la alúmina gamma ha recibido una amplia atención y se ha posicionado dentro del área termoquímica en los últimos años [5].

Adicionalmente para los óxidos de aluminio, existen diferentes hidróxidos de aluminio, minerales conocidos como bayerita, gibbsita, doyleita y nordstrandita, y los también llamados hidróxidos de óxido de aluminio, como la bohemita y diaspora.

Hoy la palabra alúmina es todavía usada de manera confusa en la literatura para referirse a grupos enteros de materiales alumínicos, incluidos los hidróxidos de aluminio. Es poco y variado el uso de la palabra “alúmina” como herramienta de nomenclatura. En la literatura la utilizan para denotar:

- Materiales de aluminio
- Anhídridos y óxidos de aluminio hidratados considerados indistintamente
- Alúmina calcinada o sustancialmente óxidos libres de agua, sin distinción de fases
- Corindón o Alfa alúmina

Las primeras investigaciones en compuestos de aluminio resultaron en el descubrimiento de minerales de aluminio, principalmente compuestos de hidróxidos de aluminio. Estos hidróxidos de aluminio son a veces, e incorrectamente llamados alúminas hidratadas. Este error es el resultado de las fórmulas estequiométricas representativas, donde la gibbsita por ejemplo, es un compuesto trihidróxido  $\text{Al}(\text{OH})_3$  el cual ha sido representado como  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  y llamado alúmina alfa hidratada [2].

La fórmula mediante la cual se conoce a la alúmina corresponde a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El verdadero significado se debe determinar según el contexto [1]. En este trabajo se hace referencia a la alúmina en relación a las sustancias con la fórmula estequiométrica anterior y en casos concretos de fases y tipos de calcinación se especificará en el texto.

### 1.2.1 Nomenclatura

En la nomenclatura para las diferentes formas de hidróxido de aluminio no existe un estándar universal, en la Tabla 1 se mencionan los diversos nombres utilizados en diferentes regiones del mundo.

**Tabla 1: Diversos nombres de la alúmina. Tomada de [7]**

Composición	Notación Francesa	Notación Británica	Notación Norteamericana
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ $0,1 < X < 0,6$	$\gamma$ Chi+Gamma Eta	- Chi+Gamma Gamma	- Chi Eta
	Gamma Delta Kappa+Delta	Delta Delta+Theta Kappa+Theta	Gamma Delta Kappa
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alfa ( $\alpha$ )	Alfa ( $\alpha$ )	Alfa ( $\alpha$ )

### 1.2.2 Estructura y morfología

La distribución atómica de los sólidos cristalinos se describe mediante una red espacial en la que se especifican las posiciones atómicas por medio de una celda unitaria que se repite por traslación ordenada [4].

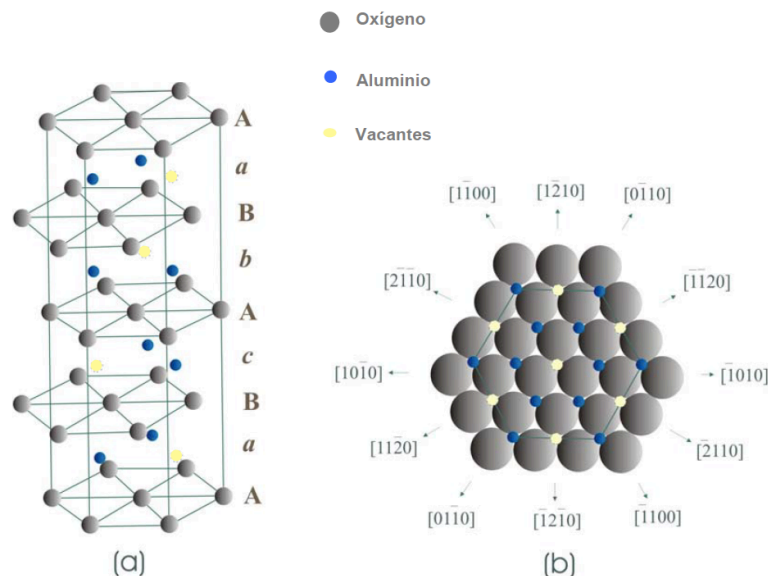
Todos los polimorfos mencionados en la sección 1.2 se componen de capas octaédricas de moléculas de hidróxido de aluminio con el átomo de aluminio en el centro y los grupos hidroxilo en los lados, con enlaces de hidrógeno que sostienen juntas las capas. Los polimorfismos varían en la forma de las capas con los arreglos de las moléculas, determinadas por la acidez, la presencia de iones y la superficie de los minerales que se forman sobre la sustancia. Bajo la mayoría de condiciones anteriormente mencionadas, la gibbsita, es la forma más estable químicamente de hidróxido de aluminio [4].

Los cuatro tipos de polimorfismos de hidróxidos de aluminio (bayerita, gibbsita, nordstrandita, doyleita) se caracterizan por la combinación de un átomo de aluminio y tres moléculas de hidróxido en diferentes arreglos cristalinos [8].

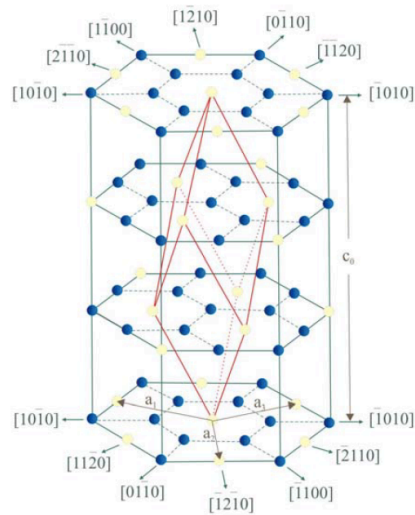
La gibbsita es el hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), mientras que la bohemita y diasporita son hidróxidos de óxido de aluminio ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ). La principal diferencia entre estos dos últimos es que la diasporita tiene una estructura cristalina diferente a la bohemita [8].

Por otro lado los cristales de óxido de aluminio son normalmente de estructura hexagonal y de diminuto tamaño, los granos de mayor tamaño se forman con la unión de numerosos cristales. Algunos cristales de alúmina tienen estructura de octaedro en el cual seis grupos de átomos de oxígeno están dispuestos de tal manera que cada uno forma un vértice del octaedro unidos en el centro por un átomo de aluminio [8].

Para dar claridad al tema, por ejemplo la  $\alpha$  – alúmina (la más común de las alúminas químicamente estables) tiene una estructura romboédrica. Cada ión de aluminio está enlazado a seis iones de oxígeno en la forma de un octaedro distorsionado y cada ión de oxígeno está enlazado a cuatro iones de aluminio en la forma de un tetraedro distorsionado. Cada ion de aluminio ocupa dos tercios de los intersticios octaédricos [8]. La estructura hexagonal compacta de la  $\alpha$  – alúmina se muestra a continuación en los Gráfico 3 y 4.



**Gráfico 3. Estructura de la  $\alpha$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . (a) Secuencia de apilamiento AaBbAcBaA (b) Plano basal presentando la subred aniónica hexagonal compacta y los cationes ocupando 2/3 de los intersticios octaédricos. Tomado de [8].**



**Gráfico 4. Subred catiónica de la  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  en la que se resalta la celda romboédrica. Tomado de [8].**

Como lo define Suárez [8] en su tesis doctoral haciendo referencia a la estructura de las diferentes fases de la alúmina o alúminas metaestables, pueden ser divididas en dos categorías: con empaquetamiento cúbico centrado en las caras (*fcc*) o con empaquetamiento hexagonal compacto (*hcp*) de los aniones de oxígeno. De la distribución de cationes dentro de cada subgrupo resultan diferentes formas polimórficas. A continuación se especifica la estructura para cada una de ellas:

- Las estructuras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  basadas en el empaquetamiento *fcc* de oxígenos incluyen las alúminas de transición  $\gamma$  (cúbica),  $\delta$  (tetragonal u ortorrómbica),  $\eta$  (cúbica),  $\theta$  (monoclínica).
- Las estructuras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  basadas en el empaquetamiento *hcp* están representadas por las alúminas de transición  $\alpha$  (romboédrica),  $\kappa$  (ortorrómbica) y  $\chi$  (hexagonal).

Como se describió en la sección anterior 1.2, la secuencia de las alúminas de transición que se forman depende fuertemente de la materia prima de partida (hidróxidos de aluminio e hidróxidos de óxido de aluminio) [4].



### 1.2.3 Fases de la alúmina

La alúmina presenta variedad de estructuras polimorfas, comúnmente llamadas alúminas metaestables de transición. El término transición aplica para las fases de transición entre ellas, el cual es irreversible y ocurre con el incremento de la temperatura en su proceso de transformación. Cada fase es estable en un intervalo de temperatura definido y depende de su arreglo cristalino, impurezas y tratamiento térmico como se observa en el Gráfico 5, el cual influye en el proceso desde la deshidratación del hidróxido de aluminio como la gibbsita para formar corindón.

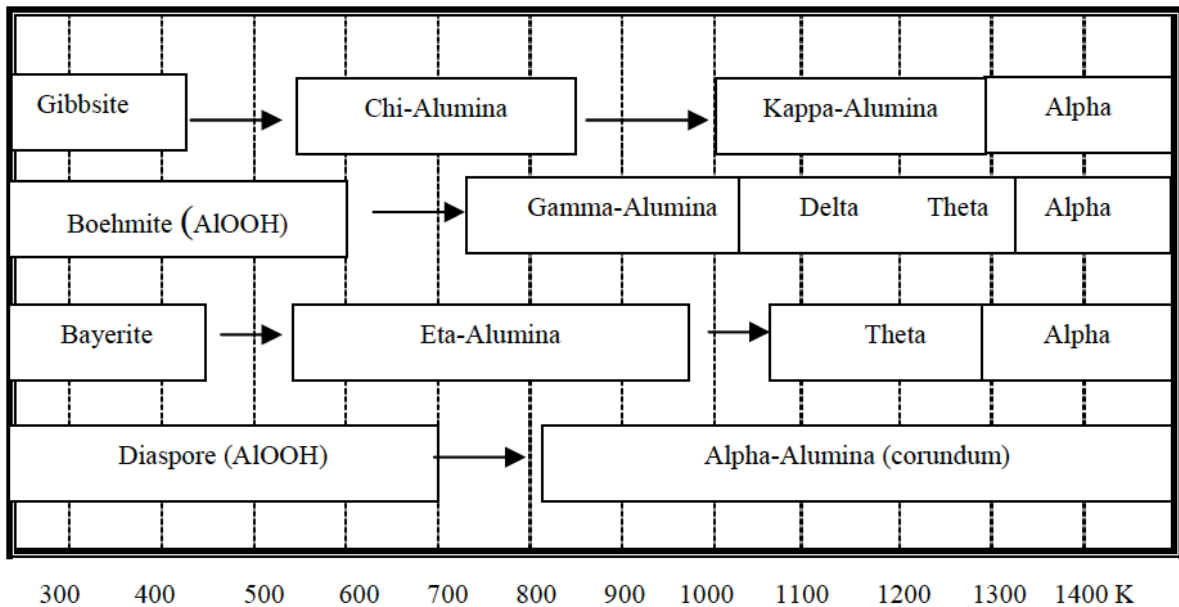


Gráfico 5. Diagrama térmico de las fases de transición de la alúmina. Tomado de [4]

La fase alfa es el tipo térmicamente más estable del óxido de aluminio y se presenta en la etapa final del proceso de calcinación posterior al tratamiento Bayer. La transformación natural entre fases ha sido estudiada por muchos años, y entre las etapas de calcinación se encuentra la siguiente secuencia: gibbsita  $\rightarrow$  bohemita ( $\gamma$  - AlOOH)  $\rightarrow$   $\gamma$ -alúmina ( $\gamma$  - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)  $\rightarrow$   $\delta$ -alúmina ( $\delta$  - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)  $\rightarrow$   $\theta$ -alúmina ( $\theta$  - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)  $\rightarrow$   $\alpha$ -alúmina.

Las transformaciones de fase son de fundamental importancia en el diseño de procedimientos para el procesamiento de cerámicos, los cuales usan materiales parcialmente calcinados. Se debe resaltar la importancia en la industria sobre la transición de las alúminas, la cual ha incrementado en función de los nuevos conocimientos que se adquieren sobre el tema, y son de gran interés en la producción del aluminio y obtención de cerámicas avanzadas [2].

## **CAPÍTULO 2. PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA ALÚMINA**

La alúmina y en general todo el hidróxido de aluminio usado comercialmente se obtiene a partir de la bauxita, mineral obtenido de las menas de aluminio y posteriormente transformado y modificado por el proceso metalúrgico Bayer, entiéndase mena como el mineral del cual se puede extraer el elemento químico de interés, por medio de procesos de extracción de base minera, ya que lo contiene en cantidad suficiente para su aprovechamiento [9]. A continuación se presenta la descripción del proceso productivo.

### **2.1 BAUXITA**

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre, sin embargo las menas de aluminio suponen una cantidad bastante pequeña de dicho material lo cual destaca la importancia de las concentraciones de éste en la roca a la hora de definir su explotación para el posterior beneficio y obtención de alúmina [10].

En menas de aluminio se extrae la bauxita la cual es una roca que está constituida principalmente por una mezcla de hidróxidos de aluminio, entre los cuales la gibbsita, bohemita y diasporita son los de mayor presencia. Adicionalmente se encuentran otros elementos químicos como la sílice, compuestos químicos como los hidróxidos y óxidos de hierro y minerales como el cuarzo libre, el caolín y las ilitas, entre otros, composición que afecta el proceso de refinamiento metalúrgico posterior [7].

El rápido crecimiento de la demanda de aluminio en el mundo en los últimos 30 años determinó el rápido aumento de las reservas prospectivas de bauxita en el mundo. Cuando en 1900 se hablaba de 120 millones de toneladas métricas y en 1953 se llegaba a cifras cercanas a 1815 millones, en 1974 llegaban a estimarse 21600 millones de toneladas métricas. Los más grandes descubrimientos de nuevos yacimientos se dan a partir de la segunda guerra mundial en países como Australia, Jamaica, Brasil, Surinam, India y Venezuela [11].

Según el instituto internacional del Aluminio, se prevé que las reservas de bauxita económicamente viables pueden proveer por lo menos los siguientes 100 años de la demanda actual. Las menas de aluminio más importantes son las bauxitas, debido a la abundancia y contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  son las únicas rentables comercialmente [12].

### **2.1.1 Tipología de yacimientos de aluminio**

Los yacimientos minerales son concentraciones naturales de uno o más minerales, que surgen como consecuencia de varios procesos geológicos que involucran diferentes escenarios y ambientes con condiciones de temperatura, presión, estructuras que favorecen el flujo de fluidos y disponibilidad de fuentes metalíferas, que dan origen a concentraciones de minerales con atributos y propiedades similares los cuales se caracterizan como un tipo de yacimiento [13].

La bauxita es una roca sedimentaria enriquecida con minerales de hidróxido de aluminio y es la materia prima más importante para la producción de aluminio ya que el 96% de la alúmina producida en el mundo proviene de ésta y solo un 4% proviene de las nefelitas y alunitas [11].

Por la elevada reactividad química, el aluminio nunca se encuentra en la naturaleza como aluminio metal, sino que se encuentra en su forma oxidada como integrante de unos 250 minerales distintos. Dentro de éstos, como lo describe David Rubinos Gonzales en la tesis doctoral “Utilización de Lodos Rojos De Bauxita en la Contención e Inactivación de Residuos Tóxicos y Peligrosos”, el grupo más importante son los silicatos y los productos de su meteorización, las arcillas, y los compuesto de hierro, silicio y titanio [14].

La composición aproximada que constituyen principalmente las bauxitas de alteración se presenta en la Tabla 2.

**Tabla 2: Composición de yacimientos de alteración. Tomado de [7]**

Compuesto	Porcentaje
$Al_2O_3$	40-50%
$Fe_2O_3$	<20%
$SiO_2$	3-10%

Las bauxitas pueden provenir de diferentes fuentes y yacimientos como los hidrotermales donde se destacan principalmente las alunitas que pueden llegar a tener un 37% de  $Al_2O_3$ , los magmáticos constituidos por rocas aluminosas, como las sienitas, nefelitas y anortorsitas que contienen más del 20% de  $Al_2O_3$ , de rocas metamórficas las cuales son silicatos de aluminio o de yacimientos detríticos los cuales son depósitos de caolín y diversas arcillas [7].

### 2.1.2 Clasificación genética de las bauxitas

Dentro de la clasificación que existe hasta el momento se diferencian las siguientes clases de depósitos, las cuales se relacionan con los procesos de meteorización de los minerales silicatados en su mayoría, generados durante los procesos *ígneos o metamórficos*.

- *“Bauxita Laterítica: Se forman por la alteración superficial de diversas rocas con contenido de aluminio medio (rocas plutónicas o volcánicas, ácidas, alcalinas y básicas, neises, esquistos metamórficos, etc.), bajo condiciones de clima tropical de altas pluviosidad, topografía plana y elevada acides de agua lixiviantes. Todo esto favorece la evacuación de material disuelto por lo que va quedando un residuo poroso, rico en sílice, arcilloso y de composición caolinítica, la que luego, si las aguas lixiviantes son muy ácidas se disolverá por completo, pero si no lo son, solo se disolverá el sílice y la alúmina libre se concentrará en forma de gibbsita, bohemita y diáspora. El tamaño de grano de las bauxitas en las que predomina la gibbsita es mucho mayor (hasta  $100\mu m$ ) que en aquellas que son ricas en bohemita ( $1-10\mu m$ ) [7].*

- *Bauxita kársticas: también conocidas como “terra rossa”, se presentan rellenas de cavidades o depresiones topográficas en rocas carbonatadas, originado por la disolución en material calcáreo, dando como resultado material caolinítico (teoría autóctona). O bien por acumulación en diversas zonas de constituyentes arcillosos, ricos en aluminio y con moderado contenido de hierro, a los que suceden procesos de lixiviación (teoría alóctona). El tamaño de estas bauxitas suele ser menor que las Lateríticas.[7]*
- *Bauxitas tipo “Tichwin”: éstos se superponen en la superficie de diferentes rocas de tipo aluminosilicatos de manera aleatoria, pero no tiene una relación directa con la formación genética de éstas. Éste material es transportado de otros lugares” [11].*

El 85% de la bauxita mundial proviene de depósitos Lateríticos, el 14% de tipo Kársticas y solo el 1% de tipo “Tichwin”. El término laterítico abarca múltiples productos, los más abundantes son las arcillas y las lateritas de hierro, rara vez se presentan lateritas de manganeso y níquel [11]. En el Gráfico 6 se muestran las representaciones gráficas de los depósitos de bauxita de tipo *kárstico*.

Para dar claridad al término laterítico se utilizará la clasificación de Schellmann, la cual es ampliamente usada y ha servido como referencia para muchos textos y temas propios de la geología, sin embargo existen teorías que refutan o tratan de dar mejor respuesta a dicha clasificación ya que requiere de un arduo y detallado estudio del mineral para obtener una clasificación bastante simple.

La clasificación para lateritas de Schellman es determinada por la ubicación de la composición química de los materiales lateríticos estudiados en un diagrama ternario tipo  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . La comparación se hace con la composición principal de las diferentes rocas relacionadas. En el Gráfico 7 se muestra el diagrama para la clasificación de la cual surge la categorización para laterización entre débil, moderado y fuerte.

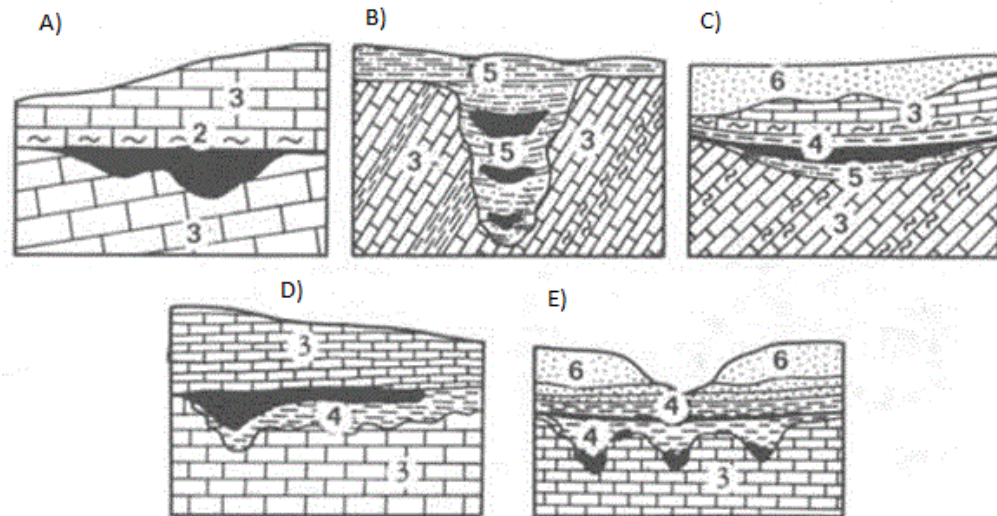


Gráfico 6. Principales tipos de depósitos de Bauxitas kársticas. A) Tipo mediterráneo, B) Tipo Kazajstán, C) Tipo timan, D) Tipo ariège, E) Tipo tula. – 1. (Negro) Bauxita 2. Marga 3. Dolomita 4. Arcilla 5. Arcilla arenosa 6. Arena. Tomado y modificado de [11].

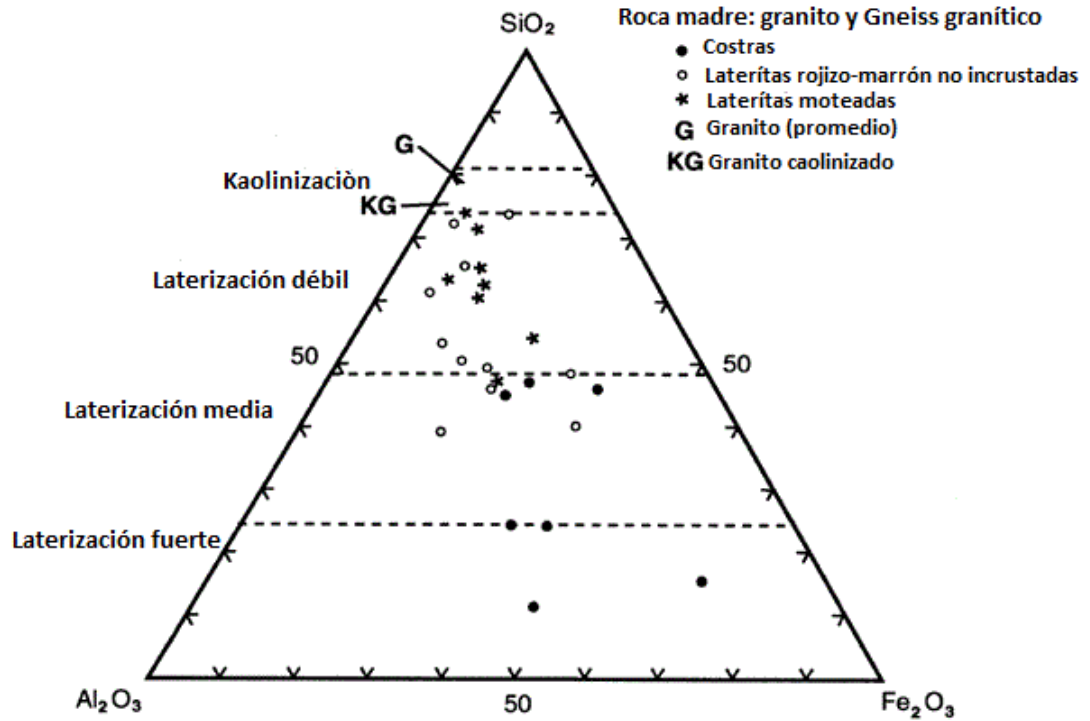


Gráfico 7. Diagrama ternario de Schellman (1983) muestra la clasificación de "laterita". Tomado y modificado de [15].

El término laterítico se refiere a materiales que están sometidos a lo largo del tiempo a intensos procesos de erosión subterránea donde el hierro (Fe) y/o el aluminio (Al) se presentan en mayor proporción y el silicio (Si) en menor proporción comparadas con las rocas madre caolinizadas, ésto debido a los procesos de arrastre subterráneo que remueve algunos compuestos de mayor solubilidad y genera un aumento de la concentración de los demás, en éste caso hierro y aluminio [15].

### 2.1.3 Distribución geológica y geográfica de las bauxitas a nivel mundial

El 90% de las reservas de bauxita mundial están concentradas en las regiones tropicales y subtropicales. Los grandes depósitos se encuentran en el Occidente de África Ecuatorial, Australia, Suramérica e India, y en menor proporción en Jamaica, Republica Dominicana. En el Caribe y sur de Europa, la bauxita se encuentra en pequeños depósitos, mientras que en Estados Unidos, Surinam, Brasil, Guyana, Rusia, China, Hungría y el Mediterráneo, se encuentra depósitos en capas intercaladas. El ancho de la beta de bauxita puede variar desde uno a 40 metros, el promedio está entre cuatro y seis metros.[12]

En el Gráfico 8 se muestra la distribución porcentual de reservas de bauxitas a nivel mundial por países para el año 2010.

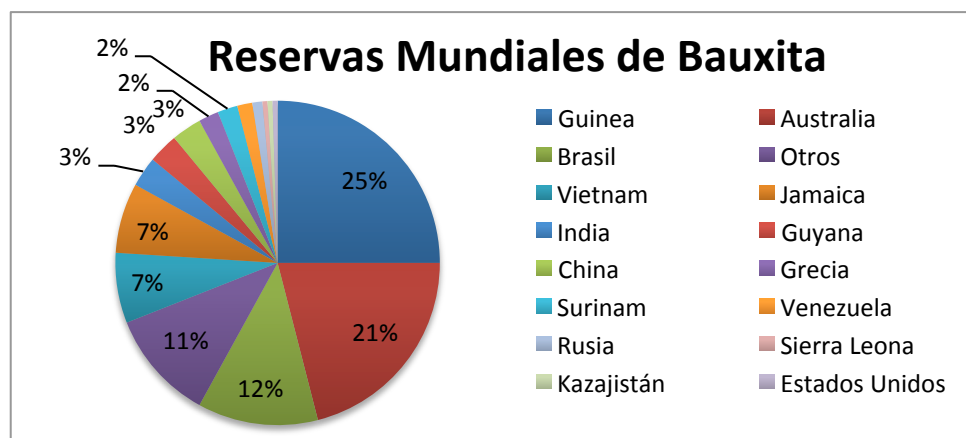
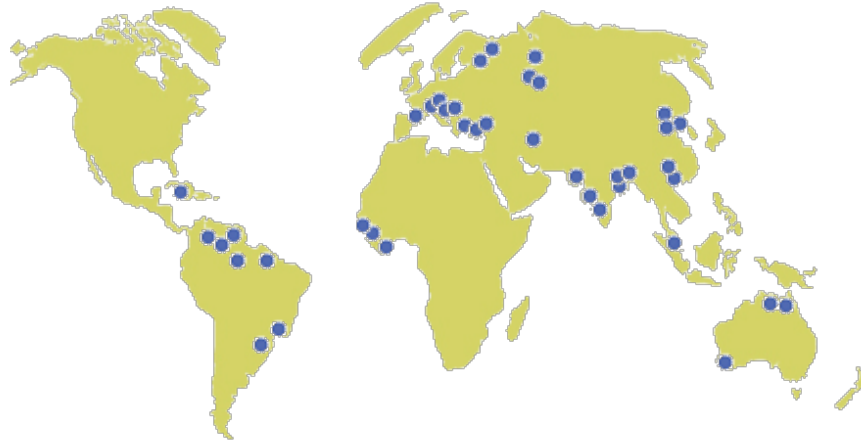


Gráfico 8. Reservas de bauxitas a nivel mundial. Tomado de [16]



En el Gráfico 9 se muestra claramente la distribución geográfica de las bauxitas a nivel mundial (*Bauxite Mining Worldwide*); los puntos azules muestran la ubicación de las minas de bauxita a partir de un estudio realizado en el año 2004.



**Gráfico 9. Distribución de la minería de bauxitas a nivel mundial. Tomado de [17]**

## 2.2 OBTENCIÓN DE LA ALÚMINA

Como se mencionó anteriormente, la mayor parte de la producción mundial de bauxita se destina a la obtención de la alúmina mediante el proceso Bayer, la cual se procesa posteriormente, mediante el método electrolítico *Hall-Heroult*, para obtener aluminio. El proceso Bayer es usado por todas las refinerías del mundo debido al bajo costo que representa la obtención del material procesado, sin embargo existen problemáticas medioambientales que desfavorecen las operaciones y obligan a hacer procesos posteriores para la recuperación de las zonas afectadas por la extracción minera y los desechos asociados a su refinamiento, residuos sólidos llamados lodos rojos [14][18].

El proceso Bayer incluye cuatro pasos – digestión, clarificación del licor, precipitación del hidrato de alúmina y calcinación de la alúmina [3][14].

La etapa de digestión comprende a su vez tres etapas que son: (i) molienda que se utiliza para mejorar el contacto sólido líquido durante la digestión, (ii) desilicación, en la cual los componentes de la bauxita son atacados químicamente por la soda cáustica para formar un producto sólido denominado “producto de desilicación (DSP)” y (iii) digestión, etapa en la cual se lleva el lodo obtenido del paso anterior a los digestores para mezclarse con el vapor y la disolución cáustica a alta presión y alta temperatura, donde ocurren reacciones químicas rápidas y se forma una disolución de aluminato de sodio [14].

En el proceso de clarificación se separa el licor (que contiene la alúmina disuelta) del residuo insoluble de la bauxita, se purifica y se filtra. Posteriormente se elimina la totalidad de los sólidos por medio de sedimentación y agregados químicos. La disolución obtenida se enfría por evaporación rápida [14].

En la etapa de precipitación del hidrato de alúmina, la alúmina disuelta se conduce a tanques de precipitación en los cuales se añade alúmina trihidratada cristalina para promover el crecimiento cristalino. La mezcla de cristales de diverso tamaño obtenido, se separa del licor y se clasifica en tanques por “gravedad” [14].

En la última etapa de calcinación, el lodo de alúmina hidratada gruesa procedente de los tanques de precipitación se bombea a tanques de almacenamiento, donde se filtra y se lava con filtros de vacío para eliminar el licor cáustico empleado en el proceso. Este producto se conduce a las unidades de calcinación en los cuales se emplean temperaturas superiores a los 1100 °C generalmente usando gas natural como combustible. El polvo blanco obtenido se enfría posteriormente en enfriadores rotatorios hasta los 90 °C y es depositado en cintas transportadoras para su almacenamiento en silos [14].

Para concluir y complementar los procesos a los cuales es sometida la alúmina, a continuación se define el proceso de producción del aluminio el cual implica la utilización del método *Hall Herault (reducción electrolítica)*, el método de reducción más empleado comercialmente. Consiste en disolver la alúmina en un baño de criolita ( $Na_3AlF_6$ ) a 950

°C en grandes hornos, por medio de una corriente eléctrica que pasa a través del baño, entre los ánodos de carbono y los cátodos. El aluminio se pega al cátodo y va depositándose en el fondo del horno, el cual es aspirado finalmente para ser sometido a procesos metalúrgicos posteriores. El oxígeno de la alúmina se combina con el carbono del ánodo siendo expulsado como monóxido y dióxido de carbono [19].

### 2.3 LA ALÚMINA EN EL MUNDO

Las empresas más importantes a nivel mundial en la producción de alúmina son Alcoa, Reynolds, Alcan, Pechiney y Alusuisse, las cuales tienen una alta capacidad de producción tanto de alúmina como de laminados, con más de mil toneladas al año [20] tal como se indica en la Tabla 3 y en la Tabla 4 se presentan las reservas de bauxita y producción de alúmina en el mundo.

**Tabla 3. Capacidad de producción de alúmina. Tomado de [20]**

<b>Capacidad de producción de alúmina y laminados de aluminio (1000 toneladas/año)</b>		
	<b>Alúmina</b>	<b>Laminados</b>
<b>Alcoa</b>	1310	2725
<b>Reynolds</b>	2986	251
<b>Alcan</b>	3497	2250
<b>Pechiney</b>	2030	625
<b>Aluississe</b>	1236	355

Según la simulación realizada en el estudio *“Prospective Study of the World Aluminium Industry”* [20] la producción mundial de alúmina incrementará en promedio cerca del 100% hacia el 2030, pero las regiones claves para la producción como Asia, Sur América y Australia tendrán un incremento en la producción del 140%, mientras que el incremento en Norte América y Europa será aproximadamente del 70%; como se muestra en el Gráfico 10. Por otra parte, el precio de la bauxita también presentará variaciones en los próximos años favoreciendo la explotación y comercialización de la misma y por supuesto, de la alúmina.

Tabla 4: Reservas de bauxita y producción de alúmina a nivel mundial. Tomado de [20]

	Reserva de bauxita		Producción de bauxita		Producción de alúmina	
	Mt	Participación	Mt	Participación	Mt	Participación
<b>Guinea</b>	7400	30%	16	10%	670	1%
<b>Australia</b>	5700	23%	56,6	36%	16382	30%
<b>Jamaica</b>	2000	8%	13,3	8%	3631	7%
<b>Brasil</b>	1900	8%	18,5	12%	3962	7%
<b>India</b>	770	3%	11,3	7%	2800	5%
<b>China</b>	700	3%	15	9%	5450	10%
<b>Guyana</b>	700	3%	1,5	1%		
<b>Grecia</b>	700	3%	2,4	2%		
<b>Surinam</b>	580	2%	4	3%	1900	4%
<b>Kazajistan</b>	350	1%	4,7	3%		
<b>Venezuela</b>	320	1%	5,5	3%	2100	4%
<b>Rusia</b>	200	1%	6	4%	3131	6%
<b>EU-25</b>					6249	12%
<b>USA</b>	20				4340	8%
<b>Otros</b>	3400	14%	4	14%	9634	12%
<b>Total</b>	24740	100%	159	100%	54000	100%

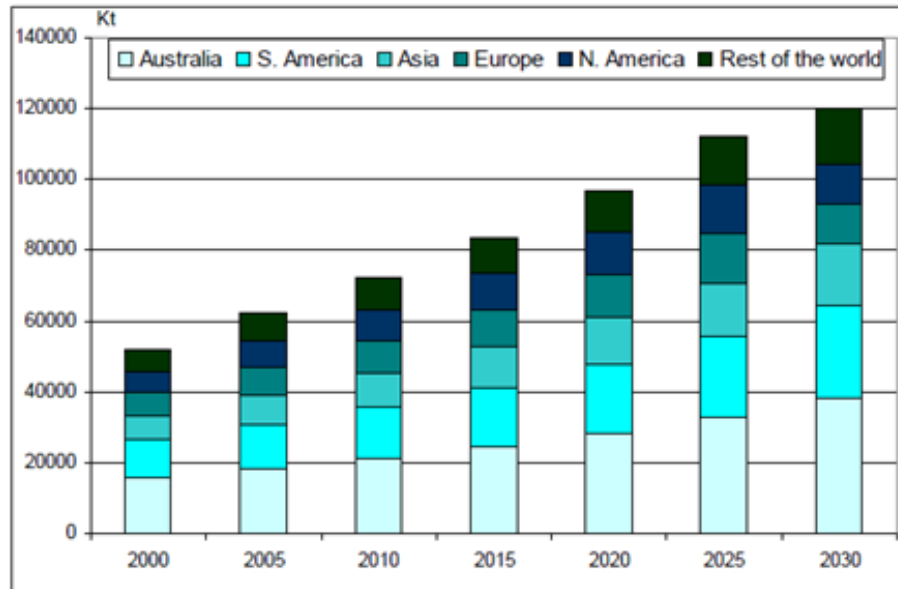


Gráfico 10. Producción de alúmina por región. Tomado de [20]

## 2.4 CALIDAD (SGA) Y PROPIEDADES

Como se describió anteriormente, la alúmina posee variedad de propiedades fisicoquímicas que determinan su aplicación y su comportamiento en las mismas. A continuación en las Tablas 5, 6 y 7 se presentan de manera resumida las propiedades del material en función de su porcentaje de pureza.

**Tabla 5: Propiedades mecánicas de la  $\alpha$ -alúmina. Tomado de [21]**

Pureza	Módulo de compresibilidad (GPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Módulo elástico (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Tenacidad a la fractura ( $\text{MPa m}^{1/2}$ )	Relación de poisson	Módulo de corte (GPa)	Resistencia a la tracción (última) (MPa)
85%	130	1900	3,42	220	300	3,5	0,22	110	
90%	160	2500	3,6	275	340	3,5	0,22	130	
94%	170	2100	3,7	300	350	4,5	0,21	150	120
96%	170	2300	3,72	300	360	4,5	0,21	150	130
99,50%	220	2600	3,89	370	380	4,5	0,22	180	170
99,80%	220	2700	3,92	370	380	4,5	0,22	180	170
99,90%	230	2900	3,93	385	410	4,5	0,23	190	180

**Tabla 6: Propiedades eléctricas y térmicas de la  $\alpha$ -alúmina. Tomado de [21]**

Pureza	Constante dieléctrica (MHz)	Rigidez eléctrica ( $\text{MV}/\text{m}$ )	Resistividad eléctrica ( $10^x \Omega\text{m}$ )	Temperatura máxima		Calor específico		Conductividad térmica a temperatura ambiente ( $\text{W}/\text{mK}$ )
				estabilidad de forma sin carga ( $^{\circ}\text{C}$ )	inicio de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	Convencional ( $\text{J}/\text{kgK}$ )	Volumétrico ( $\text{J}/\text{m}^3\text{K}$ )	
85%	8,2	9,5	12	1400	2040	-	-	16
90%	8,7	8,6	12	1500	2040	-	-	17
94%	9,3	8,3	12	1700	2040	880	3200	22
96%	9,3	8,3	12	1700	2040	880	3200	25
99,50%	9,8	8,6	12	1750	2040	880	3400	30
99,80%	9,8	8,6	12	1750	2040	860	3300	30
99,90%	9,8	9	12	1750	2040	840	3300	31

**Tabla 7: Otras propiedades importantes de la  $\alpha$ -alúmina. Tomado de [21]**

Pureza	Velocidad del sonido ( $10^3 \text{ m}/\text{s}$ )	Rigidez en relación al peso ( $\text{MNm}/\text{kg}$ )			Resistencia con relación al peso ( $\text{KNm}/\text{kg}$ )			Expansión térmica (20-1000 $^{\circ}\text{C}$ ) ( $\mu\text{m}/\text{mK}$ )
		Volumen	Cizalla	Tensión	Compresión	Flexión	Tensión	
85%	250	38	32	64	550	87		7,2
90%	270	45	38	76	690	94		8,1
94%	280	46	40	81	560	94	32	8,2
96%	280	46	40	80	610	96	34	9,2
99,50%	300	56	47	95	660	97	43	8,2
99,80%	300	56	47	94	680	96	43	8,2
99,90%	310	60	48	97	730	100	45	7,2 - 8,2

## CAPÍTULO 3. IMPACTO AMBIENTAL

### 3.1 IMPACTO AMBIENTAL MUNDIAL

Durante varios años se ha discutido la problemática ambiental generada por la producción de alúmina por medio del proceso Bayer, debido a los múltiples los escenarios de contaminación ecológica causada por los residuos generados a partir del proceso de refinación de las bauxitas, denominados “lodos rojos”, los cuales se pueden observar en el Gráfico 11.



**Gráfico 11. Problemática ambiental. Tomada de [22]**

Los problemas ocasionados por los residuos del proceso de beneficio de la bauxita inevitablemente resultan en muertes y perjuicios al medio ambiente si se considera la gran cantidad de metros cúbicos de material caustico arrojado en cercanías al proceso, los cuales contaminan la tierra y los afluentes de agua cercanos, problemática que se registra actualmente en varios informes a nivel mundial [22].

La cantidad de residuos químicos generan un gran impacto en los componentes bióticos, físicos y sociales de las regiones cercanas a la producción de alúmina. Es común que en dichas regiones el manejo de los componentes vegetación, fauna y suelos no sean atendidos bajo un modelo de protección y conservación del medio, lo cual en el largo plazo se

evidencia en el deterioro de la zona y el no adecuado aprovechamiento de los recursos terrestres [23].

Los modelos de restablecimiento de las estructuras afectadas y diagnósticos de peligro latente quizá no han sido los suficientes y han concluido en extensos daños, como lo sucedido el pasado 4 de octubre de 2010 en Ajka, localidad de Hungría. Uno de los mayores desastres ambientales de la historia derivados del procesamiento de bauxita. En el Gráfico 12 se puede observar el recorrido del contaminante en la zona afectada [23].



**Gráfico 12. Mapa hidrográfico de la zona afectada en Hungría. Tomado de [23]**

Aproximadamente 2 millones de metros cúbicos de lodo caustico altamente corrosivo colapsaron sobre tres aldeas cercanas, dejando nueve personas muertas y más de 120 heridos, sin contar el grave daño generado sobre la biodiversidad y ecosistema del río Danubio, el río más largo de la Unión Europea y el segundo más largo del continente europeo. El lodo rojo derramado y que posteriormente alcanzo el río mencionado, mató gran cantidad de animales y extensas áreas de material vegetal a su paso, como se muestra en los Gráficos 13, 14, 15 y 16.



**Gráfico 13. Soldado húngaro vistiendo traje de protección química caminando en calles contaminadas con lodos en la ciudad de Devecser, Hungría. Tomado de [24]**



**Gráfico 14. Daño al ecosistema por contaminación de lodos rojos en Hungría. Tomado de [24]**



**Gráfico 15. Fotografía aérea de contaminación con lodo rojo en población de Kolontar, Hungría. Tomada el 5/06/2010. Tomado de [24]**



**Gráfico 16. Fotografía aérea tomada el 05/06/2010 muestra la pared rota en el depósito de lodos rojos. Tomada de [24]**

Sin embargo no es solo el derrame del lodo el problema que se genera con el procesamiento de la bauxita, los cúmulos del material caustico expuestos al sol se secan debido a la evaporación del agua que en estos está contenida, lo cual convierte el lodo en polvo fino que es arrastrado por el viento y rodea el área circundante, algunas veces siendo este fenómeno de tan gran envergadura que forma grandes nubes rojas de polvo [22].

Este grave evento incrementó las alarmas públicas del dificultoso y peligroso problema que esté tipo de industria puede generar. A continuación en la Tabla 8 se presentan los 20



mayores desastres que han ocurrido durante los últimos años en diferentes regiones del mundo, sin considerar muchos otros problemas ocurridos anteriormente y posteriormente a éstos.

**Tabla 8. Casos de daños ecológicos generados por lodos rojos. Tomado de [22].**

<b>Caso</b>	<b>Mes/Año</b>	<b>Compañía</b>	<b>País</b>
1	Mayo 26, 2012	Guangxi Huayin Aluminium	China
2	Enero 12, 2012	Rusal	Irlanda
3	Diciembre 10, 2011	Alcoa	Islas Vírgenes
4	Octubre 17, 2011	Corporación Venezolana de Guayana	Venezuela
5	Junio 2, 2011	Rusal	Italia
6	Mayo 16, 2011	Vedanta	India
7	Marzo 3, 2011	Rusal	Ucrania
8	Octubre 22, 2010	Sherwin Alúmina/ Noranda/Alcoa	USA
9	Octubre 4, 2010	Magyar Aluminium	Hungría
10	Junio 27, 2010	Vedanta	India
11	Marzo 23, 2010	Rusal	Jamaica
12	Febrero 1, 2010	Rusal	Jamaica
13	Abril 27, 2009	Norsk Hydro	Brasil
14	Marzo 6, 2009	Alcoa	Australia
15	Agosto 20, 2008	Rio Tinto Alcan	Canadá
16	Febrero 21, 2008	KAP aluminium	Montenegro
17	Abril 6, 2007	Rio Tinto Alcan	Canadá
18	Mayo 14, 2006	Alcoa	Australia
19	Mayo 6, 2002	Alcoa	Australia
20	Desde 1966	Rio Tinto Alcan	Francia

### 3.2 IMPACTO AMBIENTAL NACIONAL

El impacto ambiental que podría generarse gracias a la explotación de la bauxita, puede clasificarse en dos grupos: el primero es el debido a la erosión, como consecuencia de la extracción del material bauxítico que se encuentra en el yacimiento, y el segundo es debido al lavado del material para disminuir el contenido de impurezas presentes en el mismo.[25]

Con el lavado del material lo que se genera es un enturbiamiento de las corrientes naturales empleadas para tal fin [25]. A continuación se presentará el reporte de un caso de contaminación generado por el lavado del material en una cuenca hidrográfica de Colombia.

El periódico El Tiempo, publicó un artículo el 18 de marzo de 1991 titulado “*UN PAISAJE LUNAR*” en el cual expuso una problemática en la cuenca hidrográfica del río Claro, ubicada al occidente de Jamundí sur del Valle del Cauca, una de las regiones colombianas alteradas ecológicamente por los residuos provenientes del procesamiento de bauxitas, específicamente para la producción de sulfato de aluminio tipo B. El artículo expuso además que la mayor cantidad de minas de procesamiento del mineral ubicadas en el corregimiento de San Antonio, Villa Colombia y la vereda La Olga, se han explotado irracionalmente durante 25 años y han generado toneladas de residuos de aluminio y material arcilloso para ese entonces.[26]

El mineral obtenido del proceso (sulfato de aluminio tipo B) con fórmula  $Al_2(SO_4)_3$  y con contenido de hierro inferior al 1,5% es producto de la explotación no planificada, es usada ampliamente en la purificación del agua potable en las plantas de los acueductos del país [26].

La principal problemática presentada en el artículo refiere a las toneladas de residuos aluminicos y material arcilloso que se deposita en el lecho de la cuenca hidrográfica del río Claro, afluente del río Cauca. Para ése entonces los estudios presentados en el documento datan de 1981 realizados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) en los cuales se exponía que la tasa de sedimentación del río era de 7,4 toneladas diarias, cifra que para el año 1989 creció a 38 toneladas diarias, ocasionado en cierta medida por el proceso de lavado a mano de la bauxita por parte de los mineros [26].

El resultado entonces de las acciones mineras es considerable, hasta el grado de dejar gran parte de la zona de la cuenca hidrográfica sin oxígeno o anaeróbica, perjudicando animales

y plantas acuáticas, sin considerar la destrucción en la capa vegetal y materia orgánica ocasionada por la explotación a cielo abierto [26].

En el momento se propusieron varias soluciones al problema por parte de la CVC, el Ministerio de Minas, la alcaldía de Jamundí, el Grupo Interdisciplinario de Asesorías para la congestión (GIAC) e Industrias Puracé del Cauca, con el fin de recuperar y defender la ecología de la zona, programa del cual hoy no se tiene conocimiento de los alcances obtenidos [26].

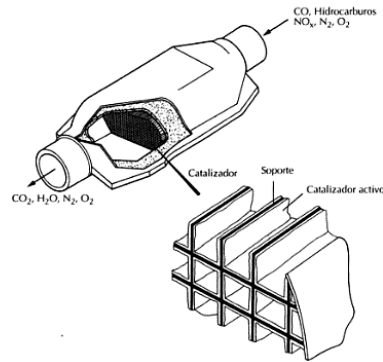
## **CAPÍTULO 4. APLICACIONES A NIVEL MUNDIAL**

Actualmente los cerámicos avanzados han dado paso a una amplia variedad de desarrollos y aplicaciones que pueden ir desde los motores de combustión interna o la transmisión de energía hasta prótesis e implantes en la industria médica. Las tecnologías emergentes han convertido los cerámicos avanzados en materiales industriales líderes que logran incrementar la funcionalidad de los equipos y satisfacen diferentes necesidades. La alúmina, gracias a las propiedades presentadas en las Tablas 5, 6 y 7, puede tener una extensa variedad de aplicaciones en diferentes campos, lo cual la convierte hoy en objeto de estudio tecnológico e ingenieril [1].

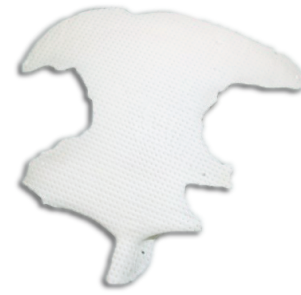
Dentro de los tipos de alúmina se destacan las cerámicas porosas de alúmina, las cuales son aplicadas actualmente en filtración y membranas catalíticas para la eliminación de compuestos contaminantes de afluentes gaseosos o acuíferos, aislamientos y refractarios como membranas de separación usadas en componentes de filtros para metales fundidos y gases de alta temperatura. Lo anterior, gracias a que poseen propiedades como, bajo peso específico, elevada superficie específica, alta permeabilidad, estabilidad térmica, resistencia a la corrosión y bajo costo de producción, lo cual las hace de gran interés en diversos campos tecnológicos como lo son el sector químico, térmico y metalmecánico [5].

En la industria química se destaca el uso de la alúmina como aditivo para recubrimientos [8], aislante refractario usado en hornos para la producción de vidrio y altos hornos en la industria siderúrgica, sensores térmicos y membranas de separación como catalizadores y soportes catalíticos. Asimismo, por su alta resistencia mecánica es utilizada en la industria médica para fabricar implantes, prótesis e injertos ortopédicos biocompatibles y con capacidad de osteointegración, elementos abrasivos y de corte para procesos de mecanizado y sellos o empaques para maquinaria en el campo metalmecánico [27]. Por otro lado, por su propiedades eléctricas ha permitido su uso en recubrimientos de dispositivos electrónicos, aislantes eléctricos en condiciones de alta temperatura y altos voltajes como bujías para

motores de combustión interna [4]. En los Gráficos 17, 18, 19 y 20 se presentan algunas de las aplicaciones mencionadas.



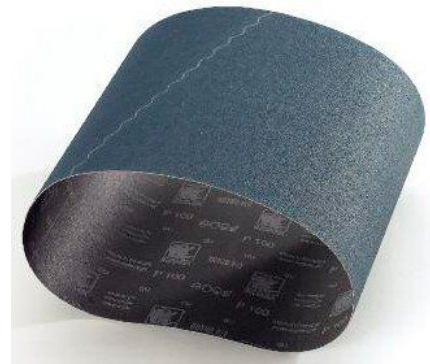
**Gráfico 17. Reactor de Catálisis Heterogénea.**  
Tomado de [28]



**Gráfico 18. Implante y Sustituto Óseo.** Tomado de [29]



**Gráfico 19. Ladrillo Refractario de Alta alúmina.**  
Tomado de [30]



**Gráfico 20. Cinta abrasiva de alúmina de circonio.** Tomado de [31]

Las aplicaciones del óxido de aluminio hoy son muy diversas, determinadas por las diferentes fases de transición de la alúmina ( $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\eta$ ,  $\theta$ ,  $\kappa$ ,  $\beta$  y  $\chi$ ) las cuales poseen diferentes propiedades químicas y físicas que determinan la aplicación específica como adsorbentes, desecantes y soportes catalíticos [32].

A continuación se mencionan algunas aplicaciones para algunas de las fases mencionadas [32]:

- $\eta$  se usa en la industria catalítica para la isomerización de olefinas
- $\delta$  en la mayoría de casos reportados, es utilizada como refuerzo de matrices metálicas
- $\kappa$  es ampliamente empleada en la tecnología de deposición química a vapor (CVD)

De igual manera, se debe aclarar que las aplicaciones utilizadas y desarrolladas a nivel mundial de la alúmina son a su vez, utilizadas en Colombia, aunque el uso principal que se le ha venido dando en Colombia a la bauxita es como materia prima para la producción de Sulfatos de Aluminio, los cuales son utilizados en los acueductos del país como floculantes para la potabilización del agua [26].

A continuación se exponen algunas de las aplicaciones tecnológicas principales.

#### **4.1 APLICACIONES QUÍMICAS, TÉRMICAS Y AMBIENTALES**

El contexto operacional de los diferentes elementos que intervienen en procesos productivos pueden ser tan diversos como sistemas de fabricación existen en el mundo, y uno de los más exigentes es el campo químico, debido a las altas temperaturas, presiones, reacciones y ataques químicos e incluso esfuerzos mecánicos, lo cual hace necesario el uso de materiales con características definidas que no alteren los diferentes procesos, que sean seguros y que garanticen la calidad y pureza de los productos finales. La alúmina es uno de los materiales que cumple un papel predominante en dirección a este tipo de necesidades y desarrollos tecnológicos en la industria.

Son numerosas las aplicaciones en las que se puede emplear el material mencionado. Así, las alúminas de transición como la alúmina  $\gamma$  es un excelente catalizador por su buena área superficial y actividad catalítica de su superficie, se usa en procesos químicos como soporte catalítico en conversión de hidrocarburos, deshidratación de alcohol y oxidación de

orgánicos, para la reducción catalítica de óxidos como el óxido nítrico y el óxido de carbono [4], asimismo por su tamaño de partícula fino, tiene aplicaciones como adsorbente, como componente activo de desecantes de alúmina activada en sistemas de aire comprimido, recubrimientos y abrasivos suaves. En el campo ambiental, los procesos de recuperación, limpieza, filtración y descontaminación de fuentes acuíferas y limpieza de gases tóxicos requieren procesos de reducción catalítica y filtración lo cual permite el uso de la alúmina como compuesto de los mismos [8].

Tanto en el mercado mundial, como en el nacional, se pueden encontrar proveedores de alúmina activada, la cual es manufacturada a partir de hidróxido de aluminio mediante deshidroxilación para producir un material altamente poroso, que debido a dicha característica el material químico se emplea en proceso de filtración y retención de agua u otros compuestos químicos disueltos en el aire o agua como fluoruros, peróxidos, arsénico y selenio [33]. Por otro lado se emplea en reacciones de deshidratación como la conversión de alcohol etílico en etileno y otras en que el agua es el reactante o el producto [34] [35]. Este tipo de alúmina tiene actividad para muchas otras reacciones como la descomposición pirogenada (cracking o ruptura de los enlaces térmicamente) o isomerización (modificación de la disposición atómica de una molécula [36]) sin embargo los requisitos de un catalizador eficaz son tan altos que rara vez se ajusta un solo compuesto, por lo cual muchos catalizadores son mezclas de dos o más sustancias y la alúmina es una sustancia útil que entra en varias de esas mezclas [37].

La alúmina activada es un buen adsorbente que puede ser adaptado a múltiples aplicaciones, definiéndose adsorbente en este caso como un sólido con capacidad de atraer y retener en su superficie algunas sustancias como vapores, gases, líquidos o cuerpos disueltos [38]. Nuevas aplicaciones continúan en desarrollo por parte de las industrias que procesan el material; aunque poca información técnica es revelada, existen dos formas de ajuste utilizadas en la adaptación para aplicaciones especiales [39]:

- Variación en los procesos de activación

- El uso de dopantes

A continuación se listan algunos procesos en los cuales el uso de este tipo de óxidos de aluminio son útiles después de su proceso de adaptación [39]:

- Eliminación de HCl (ácido clorhídrico) y HF (ácido fluorhídrico) de gases y líquidos
- Eliminación de gases ácidos de hidrocarburos (COS, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CS<sub>2</sub>)
- Eliminación de compuestos oxigenados y bases de Lewis (compuestos que pueden donar un par de electrones)
- Eliminación de compuestos orgánicos polares
- Eliminación de As<sup>5+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Cl<sup>-</sup> y F<sup>-</sup> del agua
- Eliminación de SO<sub>2</sub> con alúmina alcalinizada

En las acciones de tratamiento de agua la alúmina es útil y efectiva. Recientes estudios demuestran el buen rendimiento para la remoción de arsénicos y fluoruros del agua. La alúmina es particularmente efectiva para la adsorción de As<sup>5+</sup>, que se encuentra en la solución acuosa como H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup> [39].

En los procesos de eliminación de humedad se utilizan secadores deliquescentes como se puede observar en el Gráfico 22. Por ejemplo, las sustancias desecantes utilizadas en éstos como la alúmina juegan un papel tan importante como la sílica gel ya que posee mejores capacidades de absorción de humedad que las zeolitas. Sin embargo cuando altas cantidades de vapor de agua en el aire se requiere retirar a baja presión de vapor, las zeolitas son las indicadas ya que las capacidades de humedad a baja concentración son mayores, como se muestra en el Gráfico 21 [39]. En el Gráfico 23 se muestra la utilización de la alúmina como recubrimiento refractario gracias a su excelente comportamiento a altas temperaturas, en el Gráfico 24 como abrasivo, aplicación dada debido a su dureza y en el Gráfico 25 como catalizador de alta resistencia; entre otros.



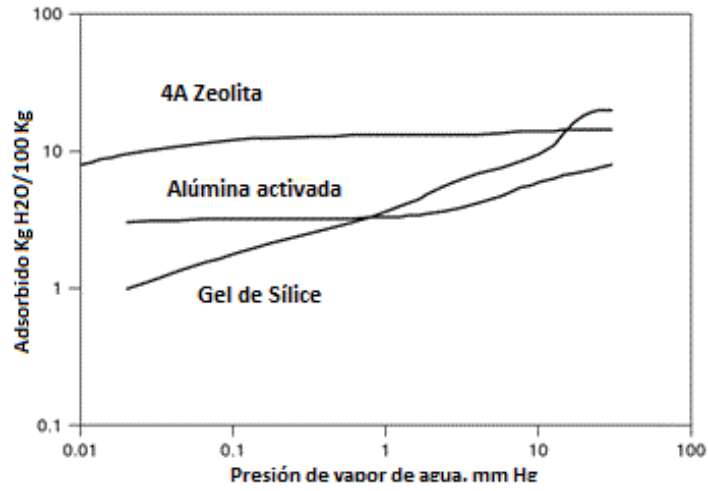


Gráfico 21. Comparación de la adsorción de agua entre sílica gel, Alúmina activada y 4A Zeolita. Adsorción Kg H<sub>2</sub>O/100 Kg vs. Presion de vapor de agua mm Hg. Tomado de [39]



Gráfico 22. Deliquescent Air Dryer Van Air D-72. Secador de Aire Delicuescente. Tomado de [40]



Gráfico 23. Pyro-Paint™ 634-AL AREMCO Recubrimiento refractario de alta temperatura base alúmina. Tomado de [41]



Gráfico 24. Abrasivo de alúmina 98,5% para metalografía. Tomado de [42]

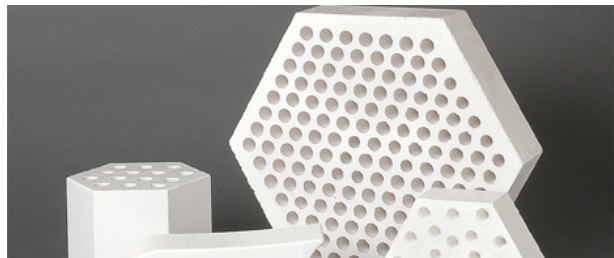


Gráfico 25. Christy's CUSTOM-CRAFTED™ Hexagonal Target Tiles. Catalizador alta resistencia a la erosión 99,99% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Tomado de [43]

La estructura de  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  es la única forma estable a temperaturas superiores a 1200 °C y algunas de las propiedades más destacables son su alta dureza (15-20 GPa), la elevada temperatura de fusión (2100 °C), la resistencia a la abrasión, la alta resistencia mecánica, química, eléctrica y su alta conductividad térmica (30 W/mK a 100 °C) comparada con otra cerámicas como la circona estabilizada (2 W/mK a 100 °C), mullita (5.9 W/mK a 100 °C) o la espinela (15 W/mK a 100 °C) [8].

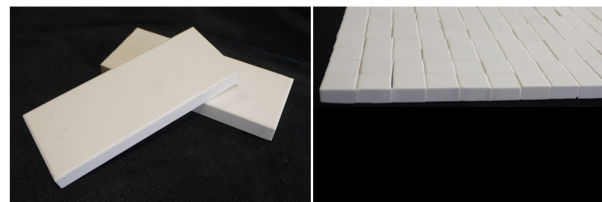
Es común encontrar en procesos petroquímicos e industria de fertilizantes la implementación de bolas con alto porcentaje de alúmina ( $\geq 99\%$ ) tal cómo se muestra en el Gráfico 26 en su grado más alto de calcinación, es decir  $\alpha$ -Alúmina, lo cual otorga altas propiedades mecánicas y alta resistencia al estrés térmico [44]. En función de la densidad, el material cerámico se emplea como material refractario en aplicaciones que requiera una elevada temperatura cuando presenta una densidad alrededor del 99.8%, dado su alto punto de fusión cómo se observa en el Gráfico 27. La alúmina con densidades entre 80% y 94.5% se emplean generalmente como aislante eléctrico o como componente mecánico en aplicaciones de baja temperatura [8].

Las principales propiedades físicas de la alúmina alfa son:

- Alta dureza y resistencia mecánica
- Libre de corrosión
- Estabilidad química



**Gráfico 26.** Bolas de alúmina para soportes de catalizadores petroquímicos e industria de fertilizantes XIETA®. Tomado de [44].



**Gráfico 27.** Piezas especiales de alúmina anti-desgaste XIETA® para todo tipo de industrias. Tomado de [45].

Por otro lado, son múltiples los componentes y compuestos usados en pinturas y recubrimientos en general, pero actualmente la aplicación de nanopartículas como aditivos para los recubrimientos orgánicos son un campo de gran estudio tecnológico. La alúmina como materia prima para la fabricación de esmaltes puede actuar como matificante en función del tamaño de partícula utilizado y proporción en la mezcla de frita y caolín [46].

El fin de adicionar aditivos en pinturas y barnices es la mejora de las propiedades finales. En el caso de la adición de alúmina, se mejora el comportamiento frente al rayado y la abrasión sin afectar la transparencia, el brillo y la flexibilidad, sí el tamaño de partícula utilizado se encuentra dentro de la escala nanométrica. En la reacción de la alúmina con el esmalte ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{ZnO}$ ) es posible que se formen nuevas fases cristalinas como la anortita y la gahnita que incrementan la viscosidad de la fase vítrea generando vidriados con propiedades técnicas y estéticas diferentes [46] [47].

## **4.2 APLICACIONES MÉDICAS**

Los materiales biocompatibles se comenzaron a utilizar en la época de los egipcios, encontrando hoy momias con ojos, orejas, dientes y narices artificiales. A lo largo del tiempo se han generado avances en materiales diseñados especialmente para las áreas médicas y odontológicas que en la actualidad son empleados para remplazar o suplementar funciones de tejidos del cuerpo humano o pérdidas óseas y de la cavidad oral con fines estéticos y/o funcionales [48], por lo cual se debe tener seguridad que la interacción biológica entre tejidos e implantes sea mínima con el propósito de incrementar la esperanza y calidad de vida del paciente y que los materiales dispuestos no alteren ni generen inconvenientes sistémicos al paciente [49].

La eliminación o reducción del uso de materiales metálicos en procedimientos funcionales, estéticos y cosméticos no sólo logra un aspecto natural sino que disminuye los problemas que generan las aleaciones y metales aún empleados como el titanio, que debido a la no interacción química del material con el tejido óseo, puede generar un desligamiento del

implante en el futuro. Por otro lado, el uso de materiales cerámicos en el cuerpo humano requiere que dentro de las características de los mismos exista una alta resistencia a la disolución ya que los medios son constantemente húmedos y no pueden generar daños en los tejidos circundantes, además de hacer posible la osteointegración con el fin de lograr una unión directa, estructural y funcional entre el implante y el hueso [48].

Como lo enuncia Suarez en su tesis doctoral [8], la alúmina es un prototipo de cerámica conocida por su biocompatibilidad y por tener buenas propiedades mecánicas para adaptarse a factores químicos, mecánicos y cinéticos presentes en el cuerpo humano, por dicha razón es ampliamente empleada en aplicaciones médicas, destacándose su uso en implantes de cerámica dental ya que la estructura cristalina de los huesos está formada por cristales nanométricos (longitud media de 50 nm y ancho de 25 nm) lo cual favorece la adhesión de las células óseas. Lo anterior puede ser observado en el Gráfico 28. Es común la sustitución de los diferentes materiales metálicos como el titanio por los compuestos de base alúmina, debido a que las interacciones entre éste y el hueso no es de tipo químico lo que puede traer consigo, como se describió anteriormente, un desligamiento del implante [47].



**Gráfico 28. Prótesis dental fabricada en material cerámico. Tomado de [50].**

Por otra parte, numerosos estudios han demostrado que el principal problema que presentan los materiales metálicos es la corrosión, la cual se produce por el contacto del metal con un fluido corporal salino que es altamente corrosivo, proceso que libera iones metálicos con alta probabilidad de incorporación al torrente sanguíneo con efectos perjudiciales. Adicionalmente, otros tipos de aleaciones de acero pueden tener efectos cancerígenos y/o provocar alergias [48].

Estudios clínicos han demostrado el desgaste significativo al rayado en las cabezas femorales de cadera hechas con aleación de titanio, lo cual ha promovido la investigación para el desarrollo de nuevos materiales para ese fin [48].

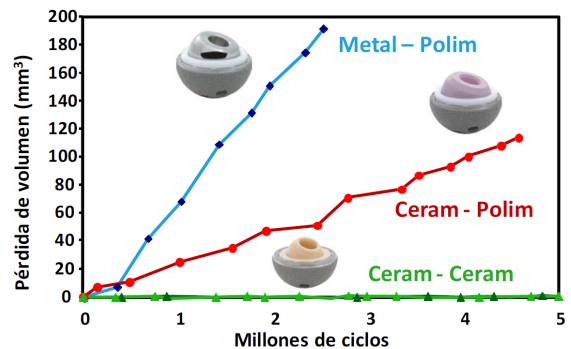
Las prótesis de rodilla y cadera que se desarrollan actualmente se concentran en compuestos cerámicos de alúmina–circona con microestructuras de tipo micro-nano. En términos simples, consiste en una matriz de alúmina en el rango micrométrico (ó nanométrico) con nanopartículas de circona [47].

Como lo describe Gutiérrez [48] en su documento “*Nuevos materiales cerámica – niobio*”, los polímeros se han utilizado igualmente en éste campo gracias a la alta ductilidad, bajo peso, fácil conformado y mecanizado pero con algunas desventajas con respecto a la alúmina, como por ejemplo, el polietileno (PE) es utilizado en sustitución de articulaciones sin mucha resistencia a productos químicos corrosivos o el polimetilmetacrilato (PMMA) como cemento óseo con efectos cancerígenos e irritantes generados en mayor medida por el monómero. Por último en el Gráfico 29 se muestra una de las principales desventajas de los polímeros la cual es el desgaste debido a la fricción producida entre piezas, lo que puede dar condición a un aflojamiento aséptico y reabsorción del tejido óseo o la posibilidad de algunos polímeros a desprender ácidos perjudiciales y otras toxinas durante el proceso de disolución, situación que no se presenta con los implantes e injertos de alúmina.

Las cerámicas más comúnmente aplicadas en las áreas médicas son la alúmina y la circona ya que tienen un desgaste mínimo comparadas con las combinaciones metal–polímero o cerámica–polímero. A continuación en el Gráfico 30 se muestra una representación esquemática del desgaste acetábulo cabeza femoral para las diferentes combinaciones de materiales [48].



**Gráfico 29. Desgaste producido sobre acetábulos de polímero en prótesis de cadera. Tomado de [48]**

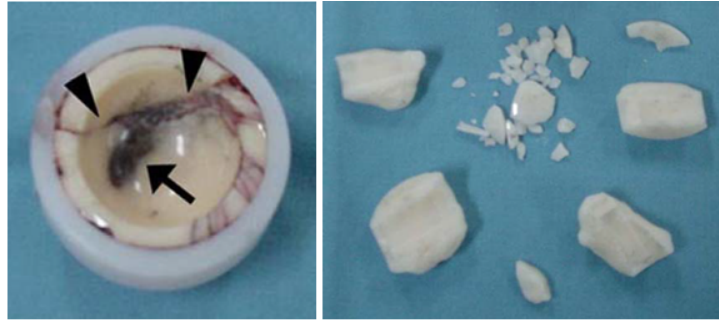


**Gráfico 30. Representación esquemática del desgaste acetábulo-cabeza femoral para las diferentes combinaciones de materiales. Tomado de [48]**

Se debe tener en cuenta que el uso de prótesis cerámica – cerámica cuenta también con desventajas en termino de resistencia mecánica y tenacidad, ya que se trata de materiales cerámicos monolíticos frágiles los cuales pueden sufrir una rotura catastrófica [48].

Procesos de investigación y optimización se ejecutan actualmente con el fin de desarrollar materiales con mejores propiedades mecánicas, optimizando la microestructura de los mismos, lo cual redundo positivamente en la resistencia mecánica, que se traduce finalmente en resistencia a la iniciación de la grieta y la tenacidad, haciendo referencia a la resistencia a la propagación de las mismas. Factores como el proceso de fabricación, mecanizado, acabado, esterilización o la manipulación durante la colocación de los implantes puede provocar daños y efectos negativos durante la vida útil de la prótesis, sin contar los efectos de corrosión, degradación o impactos debido a esfuerzos puntuales que ocurren durante el uso dentro del cuerpo humano. Toda imperfección provoca

concentraciones de esfuerzos que pueden inducir a la aparición, propagación y rotura catastrófica del material [48], esto puede ser observado en el Gráfico 31.



**Gráfico 31. Caso real rotura catastrófica implante alúmina.  
Tomado y modificado de [48]**

Con base en lo anterior se comienzan a aplicar nuevas tecnologías en materiales compuestos conformados por una matriz polimérica, cerámica o metálica y una fase discontinua de la cual dependen muchas propiedades mecánicas [48].

### 4.3 APLICACIONES MECÁNICAS

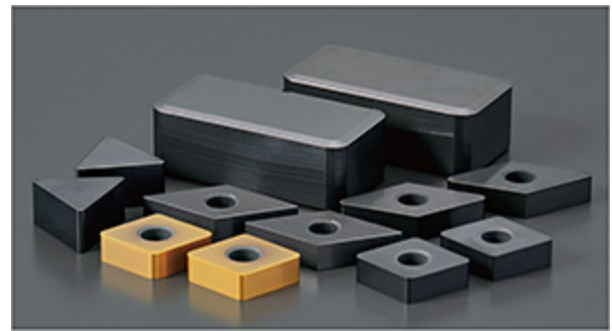
La formación de materiales de alta dureza en la naturaleza se logra bajo procesos de alta presión y temperatura, condiciones que el hombre ha utilizado para recrear materiales de similares o mejores propiedades. Sin embargo, los esfuerzos hoy se concentran en el desarrollo de compuestos súper duros ( $> 20$  GPa) basado en nanopartículas metálicas dispersas sobre matrices cerámicas de alta dureza [47]. Gracias a la elevada dureza de la alúmina se emplea hoy para fabricación y construcción de herramientas de corte, rodamientos, sellos, válvulas y componentes de bombas, con el fin de aumentar la resistencia al desgaste y tenacidad [8].

Las herramientas para corte de base alúmina se caracterizan por la alta resistencia a la oxidación y la adhesión, además de ser químicamente y térmicamente estables. Son útiles y se recomienda para las aplicaciones de corte a alta velocidad donde la temperatura tiende a ser alta y no se utiliza refrigerante. En el Gráfico 32 se presentan los insertos para corte en

cerámica especiales para hierro gris, acabado y corte en seco, y en el Gráfico 33 se muestran herramientas cerámicas con base alúmina – TiC para corte, material compuesto de mayor dureza, resistencia y rendimiento, útil para corte en seco o húmedo y parcialmente interrumpido. Éste material cerámico presenta baja plasticidad y alta dureza en condiciones de alta temperatura lo cual redunda para el corte de materiales endurecidos [51] [52].



**Gráfico 32. Insertos cerámicos para corte de base alúmina. Tomado de [51]**



**Gráfico 33. Insertos cerámicos para corte de base alúmina Ti-C. Tomado de [52].**



## CAPÍTULO 5. CONTEXTO NACIONAL

Para introducir el tema del material cerámico en nuestro país debemos aclarar que actualmente no se encuentra mucha información acerca de los yacimientos de bauxita ni de los avances en temas relacionados con la alúmina, sin embargo en este trabajo se intenta recopilar la mayor cantidad de información sobre la condición, la posible producción y la ubicación del mismo en el sector nacional.

### 5.1 INVESTIGACIONES PREVIAS Y ACTUALES

En el 1969 se comenzó a realizar un estudio por parte de INGEOMINAS, hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC), para evaluar la posible existencia de depósitos de bauxita en el norte del Cauca, con facilidades de explotación a cielo abierto. Las zonas de ocurrencia de los yacimientos del mineral se encuentran en el Cauca y Popayán, más específicamente en los municipios de Cajibío, Piendamó y Morales, los cuales tienen unas buenas vías de comunicación que facilitarían la industria [53].

Hay varios factores que llevaron a observar este sector de ocurrencia de yacimientos de bauxita, tales como, el relieve, el clima y la economía. Esta zona está ubicada en la meseta de Popayán, la cual fue formada por materiales volcánicos, tiene una topografía típica de climas húmedos, ondulada con colinas de poca elevación y con suelos de alta acidez (pH 5)[53]. Por lo descrito anteriormente se puede observar que las condiciones climáticas, geológicas y topográficas de esta meseta corresponden a un sector subtropical, en el cual hay formaciones del mineral por procesos de meteorización como fue descrito anteriormente en la sección 2.1.2 Clasificación genética de las bauxitas.

R. Ordoñez [53] en su documento acerca del aluminio en el Valle, describe con mayor exactitud las características que tienen en común los depósitos de bauxita. En el estudio se describe cómo se toman las muestras del material en la meseta de Popayán y los resultados de composición química realizados, los cuales muestran una concentración de 56% de  $Al_2O_3$  y un 6% de Sílice. Dicha concentración de  $Al_2O_3$  es bastante alta con relación a los

grandes depósitos de bauxita en el mundo los cuales tienen en promedio un 52% de  $Al_2O_3$ , pero con menos concentración de sílice.

Por otro lado en el plan nacional minero publicado en el año 1982 se describe el estudio realizado acerca de las bauxitas, afirmando que Colombia posee condiciones favorables para dichos depósitos, especialmente en el sector de La cumbre - Bitaco y San Antonio - Villa Colombia (Valle del Cauca) [54].

Según el estudio [25] realizado en el año 1987 por parte de Ingeominas, las zonas de manifestación de bauxita más importantes de Colombia, se encuentran en la Sierra de la Macarena (Meta), Llanos de Cuivá (Antioquia), Abrego (Norte de Santander) y el valle del Alto Cauca (Cauca y Valle del Cauca). Además, existen prospectos de yacimientos en Riohacha (Guajira); pero yacimientos aún no se conocen.

En el año 2006 se realizaron varios estudios con respecto a la bauxita en Colombia y por ende a la alúmina, uno de ellos fue el realizado por la Universidad de Pamplona [55]. En dicho estudio se analizaron muestras de arcillas bauxíticas en el municipio de Aipe, Huila, utilizando técnicas granulométricas e hidrométricas, difracción de rayos x, absorción atómica y determinación de las propiedades físicas por medio del parámetro ALFA. A partir de estos estudios se concluye que estas arcillas son un material producto de suelos de laterización y meteorización química avanzada de rocas previamente enriquecidas en aluminio; la composición de la bauxita estudiada presenta un contenido de 15,83% para la fase alumínica de la gibbsita, siendo éste un valor considerable en el contenido de las muestras, y por último como conclusión no menos importante se consideró el yacimiento como una fuente interesante, mirándolo desde el punto de vista económico y se propone el estudio más exhaustivo del mismo para definir las áreas de mayor concentración del material.

Otro de los estudios realizados en el 2006, es el “*análisis comparativo entre algunas materias primas minerales nacionales e importadas utilizadas en la industria del cemento*”

[56] en el cual se tomaron dos muestras de bauxitas, una procedente del interior del país, más específicamente del Valle del Cauca y la otra importada de las Guayanas. A dichas muestras se les aplicaron diferentes técnicas de caracterización tales como, DRX (Difracción de Rayos X), SEM (Análisis por microscopio electrónico de barrido), DTA (Análisis térmico diferencial) y TG (Análisis termogravimétrico) con el fin de obtener un análisis profundo de las dos muestras y realizar una comparación de las mismas.

Con el análisis DRX se observó que la especie dominante en la bauxita Colombiana es la gibbsita, aunque a su vez hay presencia de diásporo y bohemita en menor cantidad, al igual que cuarzo, óxidos de hierro y de titanio. Esta información pudo ser corroborada con el análisis morfológico hecho por medio de microscopía electrónica de barrido, en la cual se visualizó la presencia de gibbsita en pequeños cristales hexagonales de hasta dos micrómetros y la presencia de aluminio en las mismas con un porcentaje entre el 18% y 22%, mientras que en la bauxita importada el tamaño de los cristales presenta una variación desde un micrómetro hasta 30 micrómetros y el contenido de aluminio en los cristales de gibbsita están en un rango del 15% al 30%. Por otra parte, el porcentaje de los contaminantes, de silicio y hierro se encuentra en un rango aproximado de 0,5%-7% y 6%-11% respectivamente en la bauxita nacional, mientras que en la importada el porcentaje de los contaminantes de silicio, titanio y hierro, varía entre 1,5% -1,7%, 0,9% -4,7% y 0,7% - 0,9% respectivamente. Lo anteriormente mencionado está representado en los Gráficos 34, 35, 36 y 37 [56].

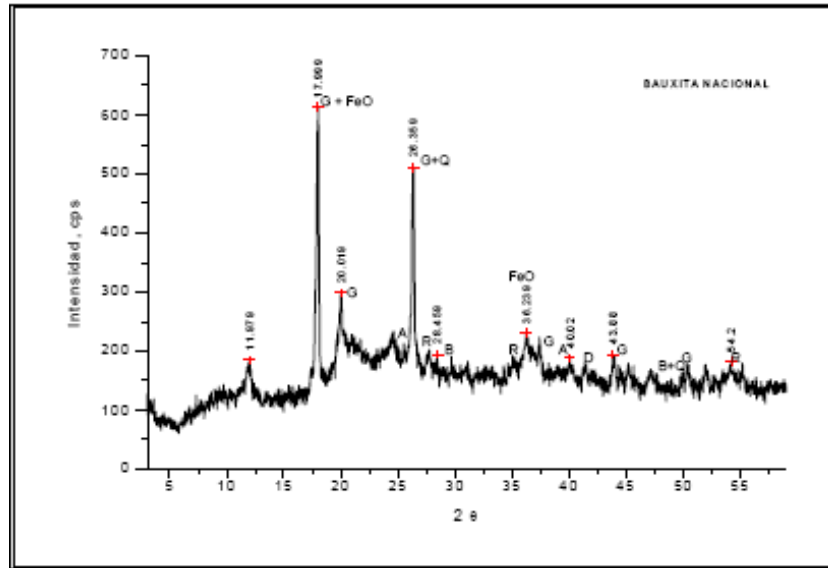


Gráfico 34:DRX de la bauxita nacional. Tomado de [56]

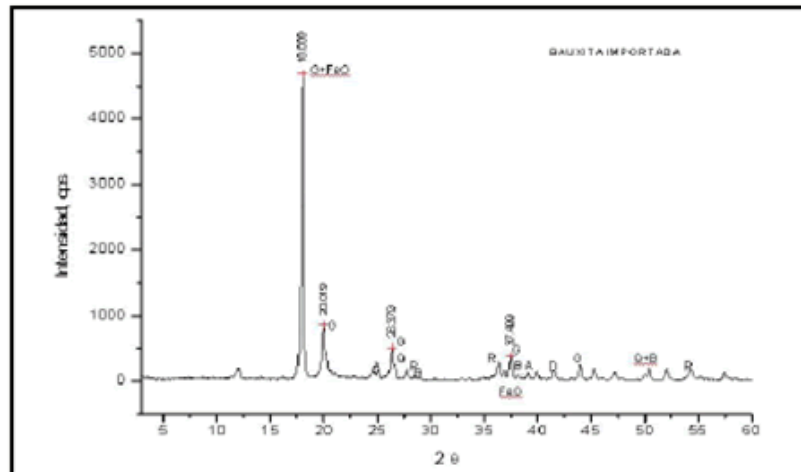


Gráfico 35: DRX de la bauxita importada. Tomado de [56]

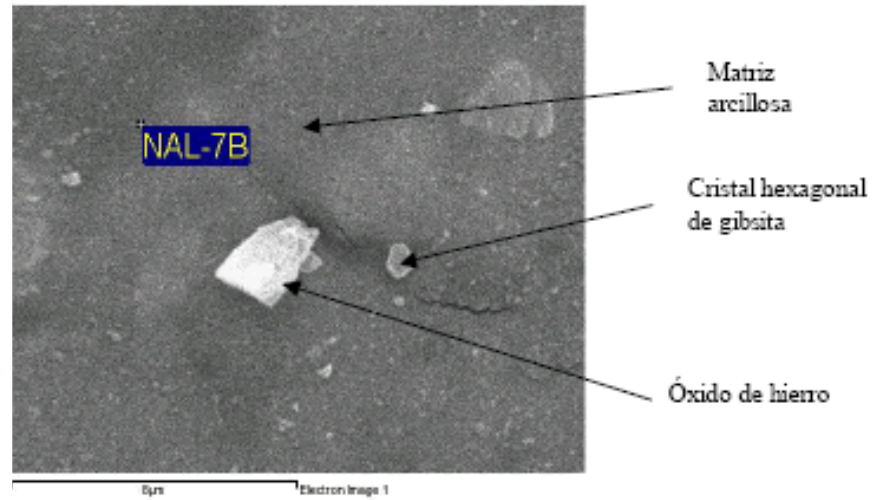


Gráfico 36. Bauxita nacional. Tomado de [56]

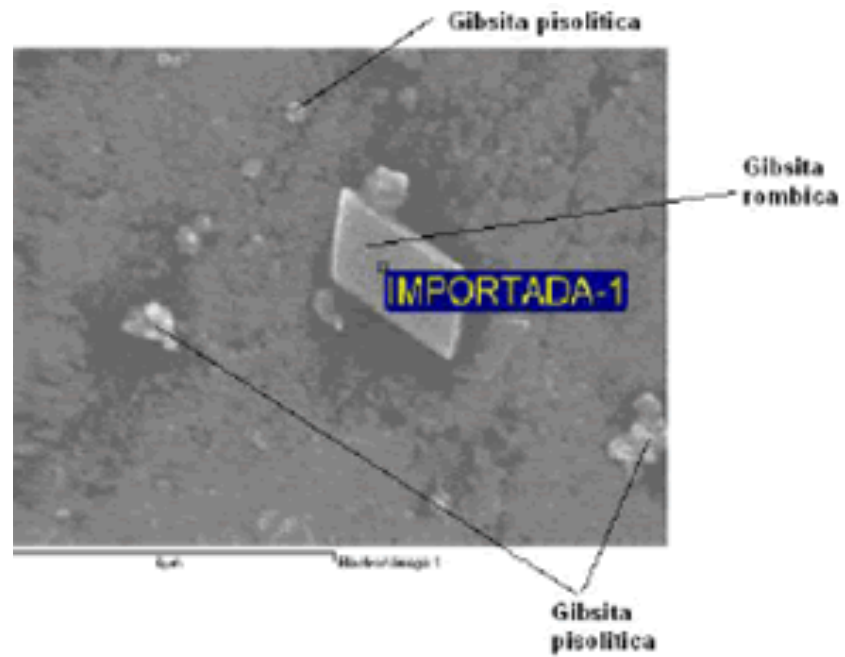
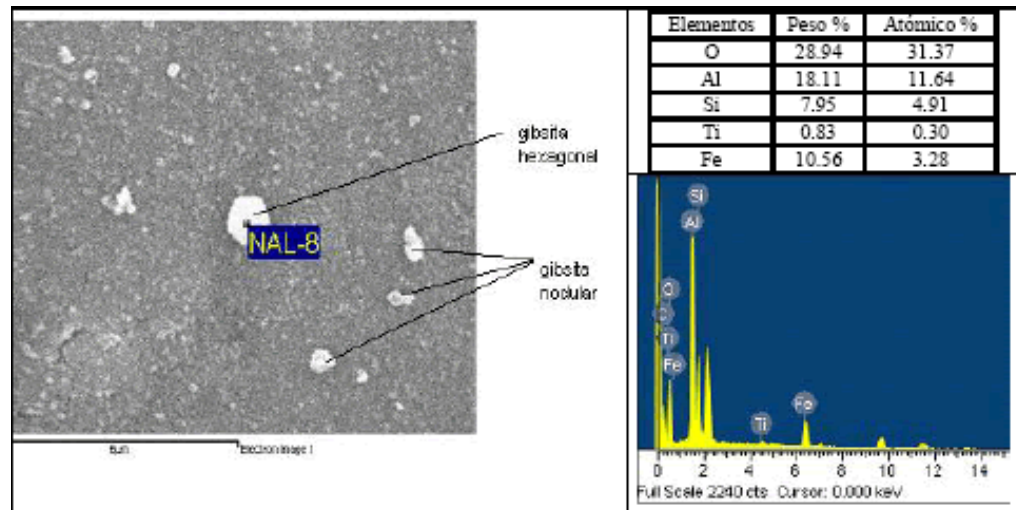


Gráfico 37. Bauxita importada. Tomado de [56]

En general el contenido de aluminio en la gibbsita nacional que se mencionó anteriormente es mostrado en el Gráfico 38.



**Gráfico 38. Composición química de los granos de gibbsita en la bauxita nacional. Tomado de [56]**

Por último en el análisis termogravimétrico, mostrado en el Gráfico 39, se observaron dos cambios diferentes de pendientes correspondientes a pérdida de agua y de radicales de OH y a la transformación de la gibbsita en bohemita a los 510°C, a partir de los 800°C no se observa ningún cambio. El análisis termogravimétrico, mostrado en el Gráfico 40 fue complementado con un análisis termodiferencial de la bauxita en el cual se visualizó que luego de los 900°C se siguen presentando pequeños cambios en la estructura con la formación de mullita [56].

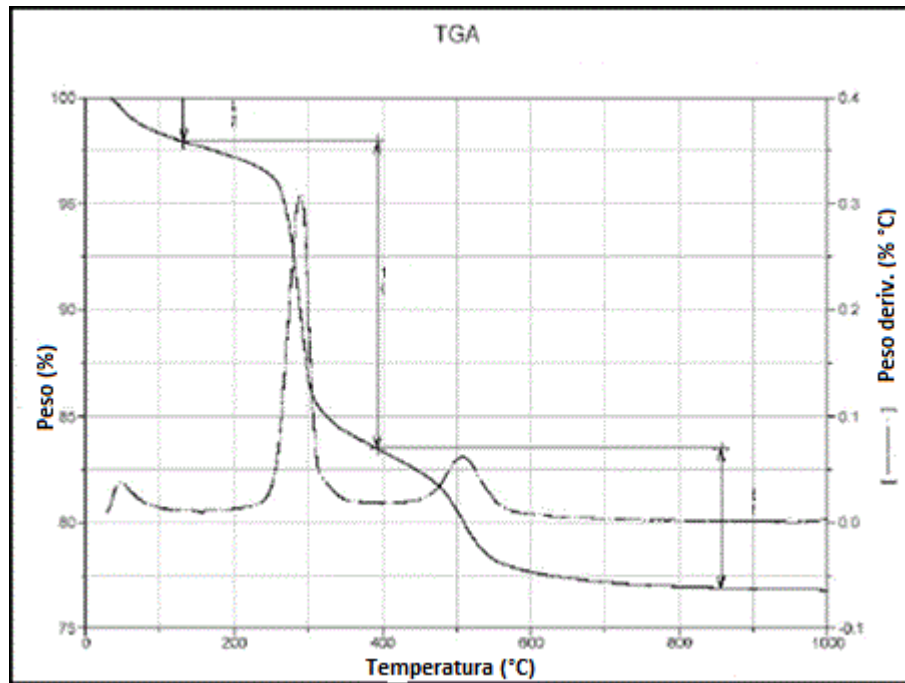


Gráfico 39. Análisis Termogravimétrico de la bauxita nacional. Tomado y modificado de [56]

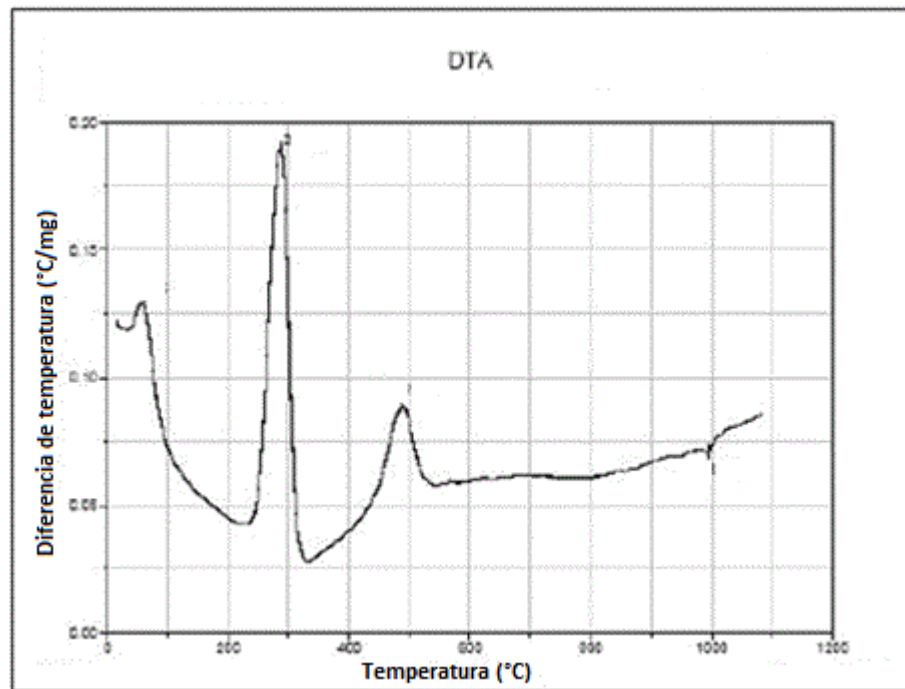


Gráfico 40. Análisis Termodiferencial bauxita nacional. Tomado y modificado de [56]

A partir de estos métodos de caracterización utilizados en éste estudio, se logró llegar a ciertas conclusiones, como por ejemplo, en la bauxita nacional analizada en el estudio, es dominante la gibbsita hexagonal y posee un alto contenido de hierro, característica que no le favorece en la reactividad, pero por otra parte, los cristales de la bauxita nacional son más pequeños y de esta manera contrarresta la desventaja que tenía con la bauxita importada respecto a la reactividad. También, un resultado muy interesante presentado en este informe es que la bauxita nacional estudiada es una arcilla con alto contenido de aluminio lo que significa un mayor contenido de alúmina que la bauxita importada [56].

Aunque la bauxita importada presenta una gibbsita más pura, en cristales monoclinicos, embebida en una matriz alumínica sin granos de óxidos de hierro, su reactividad definida mediante los análisis térmicos es muy similar a la presentada por la bauxita nacional, seguramente por el mayor tamaño de sus cristales. Para el caso de la industria cementera, el uso de una u otra estará entonces definido por lo que se desee. Por ejemplo, si se quiere un material que esencialmente aporte alúmina al producto, es más recomendable el uso de la bauxita importada. Pero, si se desea utilizar como corrector para aumentar el contenido de fase vítrea, especialmente, la felita o ferrita (conocida también como brownmillerite) es más recomendable la nacional. En cualquier caso se debe tener especial cuidado con su composición al utilizar cualquiera de las dos por las modificaciones que pueden sufrir los módulos de alúmina y sílice principalmente. Además, se deben controlar los elementos que aunque se presenta en poca cantidad son importantes por las modificaciones que pueden producir en las propiedades del producto final, como es el caso del titanio [56].

Este estudio concluye que Colombia presenta rocas y minerales industriales que sometidas a procesos de beneficio serían muy competitivas en cuanto a calidad frente a estas mismas pero importadas. La invitación es entonces a caracterizar mejor los depósitos y a buscar como darles valor agregado a estos productos minerales [56].

Más adelante, en el año 2011 en otro estudio realizado por parte de la Universidad Nacional de Colombia llamado “Estudio de materiales adsorbentes para remover Cr(VI) de fluentes



acuosos” [57] se analizó la facilidad que tiene la alúmina y dos tipos de compost para absorber y eliminar metales pesados del agua, éste estudio fue hecho debido a la necesidad de conocer diferentes métodos a los que se tienen actualmente para la eliminación de dichos metales, ya que los actuales son de alto costo para su implementación y por el contrario, la utilización de alúmina comercial y *compost* es más económico y muy efectivas ya que la alúmina presenta una adsorción del 97% del cromo y el *compost* con adición de pequeñas cantidades de alúmina (5%) tienen una remoción del 100% de cromo [57].

Por otra parte se demostró que la ceniza producida en Colombia como desecho de diferentes procesos de combustión industrial, es clase F, es decir, entre el dióxido de sílice, la alúmina y el óxido de hierro suman una concentración del 70% del total de las cenizas, lo que es muy favorable según los estudios realizados a nivel mundial de la obtención de alúmina a partir de cenizas [58].

## 5.2 EXPLORACIÓN

De la posible explotación minera en el departamento del Huila, uno de los temas más promisorios son los depósitos de bauxita ubicados en la cordillera central en los sectores de El Cable, en Nátaga y la Ceja en el municipio de Aipe. Debido a la importancia que tienen estos depósitos, la Secretaría de Agricultura y Minería propuso adelantar el estudio de dichos depósitos de composición mineralógica representada por gibbsita, caolinita y cuarzo, lo que clasifica éste depósito en el rango de arcillas bauxíticas, con espesores de 2,4 a 3 metros, por lo tanto es un yacimiento muy importante desde el punto de vista económico [59].

La extracción del material sería realizada por habitantes de la zona, quienes se atrevieron a tramitar la titulación del área para la explotación a nombre de la Cooperativa Agrominera de Bauxiteros – AGROMINERCOOP, conformada por 36 socios [59].

Para la comercialización del producto se tiene la industria de sulfato mencionada anteriormente, pero sin dejar a un lado, los estándares que debe cumplir el material que han

de ser obtenidos a partir de un procesamiento previo para mejorar la concentración de alúmina. La zona objeto de este estudio se encuentra localizado a 54 km aproximadamente del casco urbano del municipio de Aipe, en el flanco oriental de la cordillera central al noroccidente del departamento de Huila. A la zona se llega por medios terrestres a través de la vía Neiva – Flandes, luego de pasar el cruce de la entrada a Aipe se recorren seis kilómetros aproximadamente y se toma el carreteable que conduce a planadas (Tolima), por éste se recorren 54 km aproximadamente hasta llegar a La inspección de la Ceja – Mesitas. En el Departamento del Huila se extrae el mineral del sector El Cable en Nátaga, con una producción de 200 toneladas mensuales [59].

Los únicos estudios detallados que se han realizados por Ingeominas en el territorio colombiano, se refieren a las grandes manifestaciones del Alto Cauca. En este estudio, se estimó que el depósito tenía alrededor de 400 millones de toneladas de bauxita de bajo grado, de las cuales, luego del proceso Bayer, podrían ser obtenidas 100 millones de toneladas de bauxita de alto grado [25].

También se conocen yacimientos de bauxita registrados en 1999 ubicados en la subprovincia metalogénica Anchicaya - Piedra Ancha, más exactamente en los distritos 110 y 112 y en provincia metalogénica Cauca - Romeral, exactamente en el distrito 98 en forma masiva. En la Tabla 9 se puede ver el tipo de explotación en los distritos mencionados [60].

**Tabla 9. Explotación de bauxita distrito 98 y 112. Tomado de [60]**

<b>Distrito</b>	<b>Material explotado</b>	<b>Proceso genético</b>	<b>Naturaleza Mineralógica</b>	<b>Geometría</b>	<b>Edad de mineralización</b>	<b>Potencial</b>
98 (Morales, Cajibío)	Bauxitas	Residual	Óxidos	Masivo	Neógeno	Medio
110 y 112 (Darién)	Bauxitas	Residual	Óxidos	Masivo	Neógeno	Medio

### **5.3 EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO DEL MINERAL**

La explotación de dichos depósitos de bauxitas podría llevarse a cabo por medio de un sistema llamado de tajo abierto, el cual se refiere a la extracción con voladura o medios

mecánicos, para la cual se podría usar algo de la infraestructura ya existente en la región y aportar para el mejoramiento de la misma [61].

En el momento de la explotación se previeron ciertos problemas con los dueños de los terrenos, que de cierta manera se pudieron o hubiesen podido solucionar fácilmente, ya que éste no es un buen terreno para la ganadería ni mucho menos para la explotación agrícola por el pH ácido del suelo. El mejor aprovechamiento económico del material sería en la industria metalúrgica, según el estudio anteriormente mencionado realizado en el año 1969, tema que será ampliado posteriormente teniendo en cuenta las aplicaciones de la bauxita y la alúmina en Colombia y que para el mismo año habían 25 propuestas de concesión presentadas ante el Ministerio de Minas y Petróleos por diferentes proponentes [53].

En el país existen pequeñas explotaciones pero de manera ilegal, en los municipios de Jamundí, Bitaco y San Antonio (Departamento del Valle), dicha explotación se realiza a pico y pala debido al delgado espesor de la capa de roca sobre el suelo [25].

En los Gráficos 41 y 42, se observan algunas muestras de bauxitas extraídas de lugares diferentes a los mencionados anteriormente, pero no se conoce ningún indicio de posibles menas de bauxita en estos sectores (Yarumal, Antioquia; Santa rosa de osos, Antioquia). Las muestras presentadas a continuación fueron fotografías tomadas en Ingeominas, hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC).



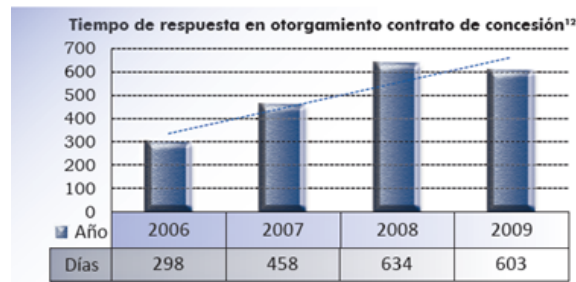
**Gráfico 41. Muestra de bauxitas. A la izquierda (Yarumal, Antioquia) a la derecha (Santa rosa de Osos, Antioquia). Tomado de [62]**



**Gráfico 42. Muestras de bauxitas. Izquierda (llanos de Cuivá, Yarumal, Antioquia) a la derecha (Guayana inglesa). Tomado de [62]**

Según el censo realizado por parte del Ministerio de Minas y Energía de Colombia actualmente se tienen siete unidades de producción minera (UPM) [63], las siete poseen títulos mineros tal como se muestra en la Tabla 10, vale la pena tener presente que en el censo no se tienen en cuenta las posibles UPM sin título minero.

Un título minero es un documento en el cual se otorga el derecho a explorar y explotar el suelo y el subsuelo, mientras que los contratos mineros son documentos en los cuales se crean derechos y deberes en torno a la exploración, montaje de minas, explotación y beneficio del material [65]. El tiempo de respuesta de otorgamiento de contrato de concesión en Colombia viene mejorando, tal como se muestra en el Gráfico 43, aunque no es suficientemente bueno como en otros países que también pasaron por éste estado de desarrollo y probablemente sea ésta una de las causas por las cuales hay una alta cantidad de UPM ilegales [64].



**Gráfico 43. Tiempo de respuesta en otorgamiento contrato de concesión. Tomado de [64]5]**

Tabla 10. UPM con y sin título minero por región. Tomado de [63]

Mineral	Total		Con Título Minero		Sin Título Minero	
	UPM	%Col	UPM	% Fila	UPM	% Fila
<b>Total</b>	6755	100	2790	41,3	3965	58,7
<b>Arena</b>	2943	43,6	1342	45,6	1601	54,4
<b>Arcilla</b>	2316	34,3	720	31,1	1596	68,9
<b>Grava</b>	1078	16	576	53,4	502	46,6
<b>Caliza para cemento</b>	477	7,1	291	61	186	39
<b>Piedra</b>	220	3,3	88	40	132	60
<b>Sal terrestre</b>	220	3,3	7	3,2	213	96,8
<b>Silicato de magnesio</b>	74	1,1	6	8,1	68	91,9
<b>Roca fosfórica</b>	50	7	49	98	1	2
<b>Basalto</b>	18	3	13	72,2	5	27,8
<b>Caolín</b>	17	3	10	58,8	7	41,2
<b>Yeso</b>	16	2	9	56,3	7	43,8
<b>Roca coralina</b>	15	2	6	40	9	60
<b>Dolomita</b>	14	2	13	92,9	1	7,1
<b>Feldespatos</b>	14	2	13	92,9	1	7,1
<b>Magnesita</b>	8	1	7	87,5	1	12,5
<b>Puzolana</b>	8	1	8	100		0
<b>Bauxita</b>	7	1	7	100		0
<b>Cuarzo azul</b>	5	1	2	40	3	60
<b>Silíceas</b>	5	1	3	60	2	40
<b>Azufre</b>	3	0	3	100		0
<b>Bentonita</b>	3	0	2	66,7	1	33,3
<b>Cal</b>	3	0	3	100		0
<b>Sin información</b>	282	4,2	195	69,1	87	30,9

#### 5.4 IMPACTO ECONÓMICO

La inversión minera en los diferentes países de América viene en constante aumento debido a los ya conocidos recursos naturales presentes en esta región, lo cual motiva a los gobiernos locales y a la inversión extranjera directa a invertir en América latina, y se estima que se invertirán US\$ 250 mil millones en proyectos mineros en América Latina de acá al año 2020 y como se observa en la Tabla 12 es importante resaltar que Colombia es el cuarto país con mejor proyección de inversiones, solamente por detrás de Chile, Brasil y Perú [66].

A pesar que algunas compañías colombianas como Locería de Colombia (Llano Grande, Antioquia), centrales Corona (Guatavita, Cundinamarca), Erekos (Rio Negro, Antioquia), Compañía Nacional de Minerales (Medellín Antioquia), Cerámicas del Valle (Suárez, Cauca) e Industria Cerámica (Usme, Cundinamarca), son grandes explotadoras de yacimientos de minerales para fines cerámicos, la DIAN reporta que los países desde donde se importó más alúmina (óxido de aluminio e hidróxido de aluminio) a Colombia entre Julio del año 2012 y Junio del 2013 son Turquía y Alemania cada uno con valores cercanos a 1.5 millones de dólares y para el mismo periodo se importaron un total de 8.8 millones de dólares del mineral [67]. A continuación en la Tabla 11 se muestran los países exportadores de alúmina hacia Colombia para el período antes mencionado.

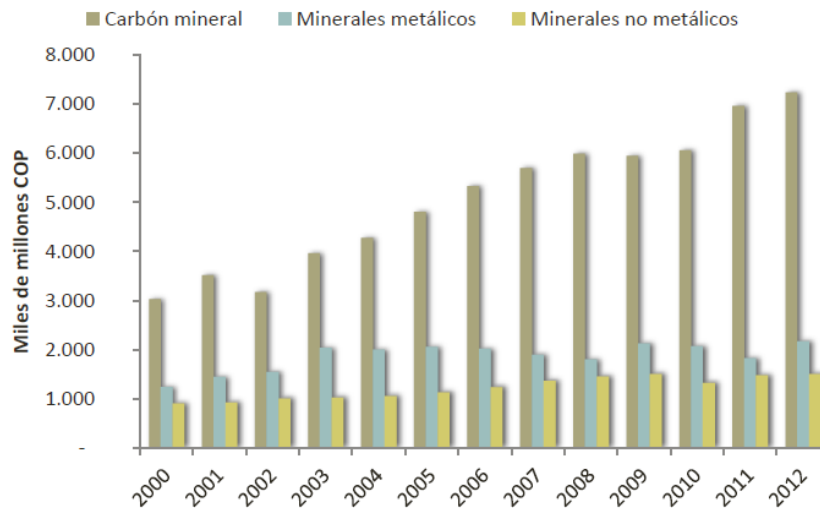
**Tabla 11. Países exportadores de alúmina. Tomado y modificado de [67]**

<b>Países exportadores</b>	<b>Total meses: julio 2012- junio 2013</b>
Mundial	8.832,00
Turquía	1.591,00
Alemania	1.509,00
Brasil	1.454,00
Jamaica	1.398,00
USA	1.259,00
China	929,00
Birmania	231,00
Francia	121,00
Venezuela	59,00
Italia	48,00
India	45,00
Swiza	36,00
Reino Unido	36,00
España	34,00
Mexico	22,00
Zonas libres	18,00
Holanda	10,00
Canadá	9,00
Japon	7,00
Austria	7,00

**Tabla 12. Inversiones previstas en América Latina. Tomado de [66]**

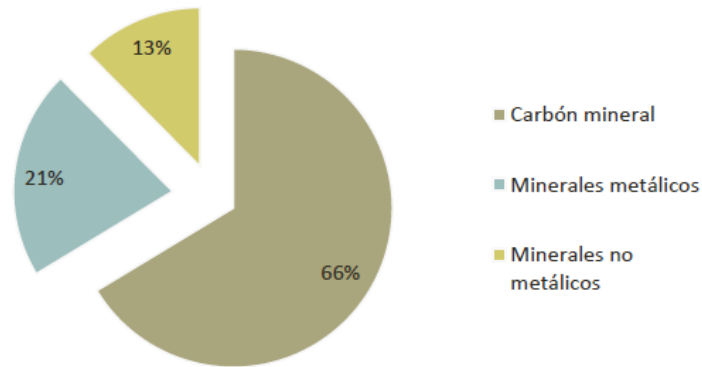
<b>País</b>	<b>Miles de millones USD</b>
Argentina	10
Brasil	58
Chile	75
Colombia	22
Ecuador	7
México	13
Panamá	9
Perú	56
<b>Total</b>	<b>250</b>

Gracias a los intereses despertados por parte de los diferentes inversionistas y del gobierno local para la explotación minera, el PIB minero de Colombia viene teniendo una tendencia positiva, aumentando desde 5,7 billones de pesos en el año 2000, hasta 10,9 billones de pesos en el año 2012, específicamente el incremento en minerales no metálicos (bauxita) ha aumentado desde 800.000 millones de pesos en el 2000, hasta casi 1.3 billones de pesos en el 2012 cómo se muestra en el Gráfico 44 [68].

**Gráfico 44: Evolución del PIB minero desde 2000. Tomado de [68]**

Por otra parte, como se muestra en el Gráfico 45, la participación porcentual de los minerales metálicos y no metálicos dentro del PIB minero es del 21% y 13%

respectivamente, lo cual resalta la importancia del sector y en los cuales se incluye la bauxita y la alúmina dependiendo de su estado, materiales que entran en la clasificación del PIB como “productos minerales no metálicos” y “productos de cerámica no refractaria para uso no estructural” [69].



**Gráfico 45: Composición del PIB minero. Tomado de [68]**



## **CAPÍTULO 6. PROSPECTIVA DE LA ALÚMINA EN COLOMBIA**

Según las investigaciones realizadas en este trabajo los puntos de vista a futuro son muy inciertos. Por una parte la alúmina es un material que cada día tiene una mayor incursión en la industria mundial y colombiana por todas sus características y propiedades que pueden ser ajustadas a aplicaciones y requerimientos específicos, pero no se evidencian iniciativas o proyectos concretos para la exploración, explotación, producción o beneficio de este material en Colombia en un futuro cercano. Lo que sí es posible afirmar a priori es que la alúmina tiene un buen mercado en el país tanto en el sector médico, que como bien se sabe Colombia presenta grandes desarrollos, como en el sector metalmecánico, eléctrico, térmico y químico, sin embargo para tener bien soportado este supuesto, es necesario realizar un estudio de mercado profundo y a partir de allí determinar la viabilidad de la producción en Colombia.

Otro punto importante y a tener en cuenta, es el impacto ambiental que la producción de alúmina genera, ya que gracias a ésto pueden presentarse problemas con los respectivos gobiernos, lo cual sería una dificultad para su producción.

Aunque la industria de los cerámicos avanzados ha venido creciendo a pasos agigantados y los posibles yacimientos estudiados en Colombia poseen la suficiente cantidad de bauxita para ensanchar sobremanera la industria química, actualmente en Colombia no existen empresas productoras de alúmina ya sea debido a la zona de ubicación de estos depósitos y lo que traen consigo, como por ejemplo, el conflicto armado y social, o ya sea por el poco conocimiento que se tenga de la alúmina.

En Colombia existen empresas que trabajan con importaciones de alúmina, tanto en el sector médico, químico, térmico cómo mecánico, lo que favorecería probablemente al desarrollo de este material.

Una de las principales oportunidades que poseen las instituciones de educación y entidades de investigación nacional es la motivación a sus estudiantes a incursionar en el tema de

materiales cerámicos avanzados que aporten al desarrollo y avance de la industria colombiana y en la apertura a un nuevo mercado nacional e internacional que ayudaría a fortalecer diferentes aspectos de la economía, ya que como fue indicado durante la presentación del documento, la participación de los materiales no metálicos en el PIB minero ha estado creciendo durante los últimos años y cada vez toma más relevancia en el desarrollo económico del país.

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Por ser Colombia un país ubicado en región tropical posee dentro de su territorio condiciones propicias para la formación de yacimientos de bauxita, aunque se tiene conocimiento de algunos, probablemente hay más de éstos a lo largo del territorio colombiano lo que sugiere mayor inquietud por parte del gobierno y sus entidades para la investigación y explotación de estos territorios, y asimismo generar empleo y beneficios económicos al país.

Los yacimientos conocidos hasta ahora ubicados en el Cauca y Valle del Cauca a pesar de tener alto contenido de aluminio lo cual favorecería la producción de alúmina altamente pura, no están siendo explotados de manera legal, probablemente por su ubicación en medio de zonas de influencia de grupos al margen la ley, lo cual a su vez no favorece el desarrollo de nuevas propuestas industriales en estas regiones.

Las buenas propiedades que tiene la alúmina en general le permiten que sea utilizada en diversos campos de la industria y representa una oportunidad de negocio a futuro por parte de diferentes industrias colombianas quienes podrían lograr desarrollar productos diseñados específicamente a las necesidades de sus clientes ó implementarlas para la fabricación de productos de tecnología avanzada. Lo anterior siendo un proceso de apalancamiento entre las diferentes universidades e institutos y las industrias innovadoras, en los cuales se desarrollan.

A pesar de los beneficios económicos y financieros que puede presentar la explotación de bauxita y la producción de alúmina en Colombia, se hace necesario la buena gestión del impacto ambiental por parte de las industrias mineras y de beneficio, sí en algún momento se implementan dichos modelos de negocio, ya que la influencia ecológica es bastante grande debido a los desechos generados en el proceso, y no permiten el crecimiento sostenible de la industria nacional. De igual manera se han de buscar y desarrollar métodos que puedan ayudar a disminuir y/o mitigar el daño ocasionado por la explotación, y

disminuir el costo económico de las mismas ya que las implicaciones ambientales de alto costo hacen aún mucho más difícil el desarrollo de la economía nacional y de nuevas industrias.

## RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

De acuerdo a la experiencia que se obtuvo durante el desarrollo del trabajo, se procede a plantear algunas recomendaciones y trabajos futuros:

Debido al amplio campo de aplicaciones de la alúmina, se propone realizar un estudio específico para cada una de las aplicaciones de la alúmina, como por ejemplo, aplicaciones biomédicas, mecánicas, químicas y eléctricas entre otros, incluyendo nuevos desarrollos en temas como materiales compuestos y aplicaciones en nanotecnología, que complementen la información provista en este trabajo y faciliten el conocimiento y el desarrollo de nuevos productos.

Se recomienda realizar estudios complementarios en relación con los suelos previamente explorados en sectores estratégicos del territorio colombiano que cumplan con las características propias de los yacimientos bauxíticos y realizar exploración de regiones en las cuales pueda existir el mineral en cuestión, teniendo en cuenta el relieve, la altura sobre el nivel del mar y el pH del suelo entre otros, con el fin de encontrar o descartar posibles yacimientos diferentes a los mencionados en este trabajo.

Como propuesta de desarrollo de oportunidades de negocio, se plantea realizar un estudio de mercado para evaluar la posibilidad de incursionar en él como productores de alúmina. Éste tipo de investigaciones daría mucho más peso e importancia a la explotación y producción de alúmina en nuestro país o por el contrario se descartaría este proceso.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. D. Cortéz Vega, “Síntesis y Caracterización de Alfa-Alúmina Reforzada con Zirconio para Medios de Molienda,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2011.
- [2] G. Paglia, “Determination of the Structure of  $\gamma$ -Alumina using Empirical and First Principles Calculations combined with Supporting Experiments,” 2004.
- [3] J. C. Batista, *Desarrollo Productivo*. Santiafo de Chile, 2001.
- [4] Z. E. Gómez Rosales, “Determinación de la estabilidad de las fases cristalinas de la Alúmina,” Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [5] M. Benítez Guerrero, L. Pérez Maqueda, P. Pena Castro, and J. Pascual Cosp, “Alúminas porosas: El método de bio-réplica para la síntesis de alúminas estables de alta superficie específica,” *Boletín la Soc. Española Cerámica y Vidr.*, vol. 52, no. 6, pp. 251–267, Jan. 2014.
- [6] Wolfram Alpha, “Aluminum Oxide,” 2014. [Online]. Available: <http://www.wolframalpha.com/input/?i=Al+++O2+->+Al2O3>. [Accessed: 25-Mar-2014].
- [7] J. P. Sancho Martinez, J. J. Del Campo Gorostidi, and K. . Grjortheim, *La Metalurgia del Aluminio*. Aluminium-Verlag, 1994, pp. 30–50.
- [8] M. Suárez, “Materiales Cerámicos Policristalinos Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y YAG con Funcionalidad Óptica,” Universidad de Oviedo, 2009.
- [9] G. C. Amstutz, *Glossary of Mining Geology*. 1971.
- [10] I. A. Institute, “Fourth Sustainable Bauxite Mining Report, IV 2008,” 2009.
- [11] G. Bárdossy, “Growing Significance of Bauxites.” p. 4, 1980.
- [12] W. Menzie, J. Barry, D. I. Bleiwas, B. E.L., G. T.G., and G. Matos, “The Global Flow of Aluminum From 2006 Through 2025,” 2010.
- [13] J. Ariosa-Iznaga and R. Díaz-Martínez, “Modelos de Yacimientos Minerales : Tipologías y Aplicaciones,” *Minería Geol.*, vol. 17, no. 1996, pp. 3–14, 2011.
- [14] D. Rubinos Gonzales, “Utilización de Lodos Rojos De Bauxita en la Contención e Inactivación de Residuos Tóxicos y Peligrosos,” *Universidad de Santiago de*

- Compostela*. [Online]. Available:  
[http://books.google.com.co/books?id=Z8XynuC\\_ySEC&pg=PA35&lpg=PA35&dq=depositos+intercalados&source=bl&ots=sars2n9znW&sig=vhyL2hOb7jG22n4c3KeY6tcmVPs&hl=es&sa=X&ei=TnRFU7TaFMnn0gGHx4E4&redir\\_esc=y#v=onepage&q=depositos intercalados&f=false](http://books.google.com.co/books?id=Z8XynuC_ySEC&pg=PA35&lpg=PA35&dq=depositos+intercalados&source=bl&ots=sars2n9znW&sig=vhyL2hOb7jG22n4c3KeY6tcmVPs&hl=es&sa=X&ei=TnRFU7TaFMnn0gGHx4E4&redir_esc=y#v=onepage&q=depositos intercalados&f=false). [Accessed: 09-Apr-2014].
- [15] R. P. Bourman and C. D. Ollier, “A Critique of The Schellmann Definition and Classification of ‘Laterite,’” *Catena*, vol. 47, no. 2, pp. 117–131, Apr. 2002.
- [16] Articone, “World Bauxitas reserves,” 2010. [Online]. Available:  
<http://arcticecon.wordpress.com/2012/02/15/aluminium-smelting-in-iceland-alcoa-río-tinto-alcan-century-aluminum-corp/>. [Accessed: 24-Mar-2014].
- [17] GDA, “Minería de bauxita a nivel mundial,” 2004. [Online]. Available:  
<http://www.aluinfo.de/index.php/production-of-aluminium.html>. [Accessed: 24-Mar-2014].
- [18] R. Román Chacón, “La Alúmina como material aislante en la fusión termonuclear. Efecto de la incorporación de carbón en las propiedades físicas,” Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
- [19] (Secretaria de medio ambiente y Recursos Naturales) and (Instituto Nacional de Ecología), *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*. 2006, p. 258.
- [20] Z. Luo and A. Soria, “Prospective study of the world aluminium industry,” *JRC Sci. Tech. Reports. EUR*, p. 79, 2007.
- [21] MakeItFrom.com, “Alumina (Aluminum Oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),” 2013. [Online]. Available:  
[http://www.makeitfrom.com/material-data/?for=Alumina-Aluminum-Oxide-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>](http://www.makeitfrom.com/material-data/?for=Alumina-Aluminum-Oxide-Al2O3). [Accessed: 26-Feb-2014].
- [22] R. Boily, “Twenty Cases of Red Hazard An Inventory of Ecological Problems Caused by Bauxite Residue From Alumina Production,” *Inforex*, 2012.
- [23] N. Thorpe, “Toxic sludge carpets homes in Hungary,” *BBC News Europe*, Kolontar, Hungary, 08-Oct-2010.
- [24] Boston.com, “A Flood of Toxic Sludge,” *The Big Picture*, Boston, 06-Oct-2010.
- [25] Ingeominas, *Recursos minerales de Colombia*, Segunda ed. Bogotá, Cundinamarca, Colombia, 1987, pp. 49–62.

- [26] El Tiempo, “Un Paisaje Lunar,” *18 de marzo de 1991*, 1991. [Online]. Available: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-45073>). [Accessed: 20-Aug-2014].
- [27] J. G. Heinrich and F. Aldinger, *Ceramic Materials and Components for Engines*. WILEY-VCH.
- [28] C. H. L. Duward F. Shriver, P. W. Atkins, *Química inorgánica, Volumen 2*. 1998, p. 372.
- [29] 3D Ceram Advance Ceramics, “Implantes y Sustitutos Oseos.” [Online]. Available: <http://3dceram.com/es/category/biomedical/implants-et-substituts-osseux/>. [Accessed: 25-Mar-2014].
- [30] Rath, “Alurath Ladrillos de alta Alúmina,” 2014. [Online]. Available: <http://www.rath-group.com/es/productos/ladrillos-densos/alta-alumina/>. [Accessed: 25-Mar-2014].
- [31] INDASA, “Cinta abrasiva de alúmina de circonio,” *Direct Industry*, 2014. [Online]. Available: <http://www.directindustry.es/prod/indasa/cintas-abrasivas-alumina-circonio-16919-38563.html>. [Accessed: 25-Mar-2014].
- [32] M. Khosravi Mardkhe, “Facile Synthesis and Characterization of a Thermally Stable Silica-Doped Alumina with Tunable Surface Area, Porosity, and Acidity,” Brigham Young University, 2014.
- [33] (DESECANTES INDUSTRIALES DEL NORTE), “Alúmina Activada,” *Silica Gel*, 2014. [Online]. Available: [http://www.silicagel.com.mx/alumina\\_activada.aspx](http://www.silicagel.com.mx/alumina_activada.aspx). [Accessed: 18-Aug-2014].
- [34] (Textos Científicos), “Derivados Del Etanol.” [Online]. Available: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/derivados-etanol>. [Accessed: 18-Aug-2014].
- [35] (Instituto Nacional de Estadísticas y Sensores Ecuador), “Ficha Técnica de Metal Mecánica, Alúmina Activada.” .
- [36] Chempack, “Catalizador de partículas sólidas de isomerización,” 2014. [Online]. Available: <http://www.petro-catalyst.es/1-2-isomerization-catalyst.html>. [Accessed: 31-Aug-2014].
- [37] (Laboratorio Gadetec), “Tipos de Alúmina.” [Online]. Available: [http://www.gadetec.es/web/guest/fija\\_alumina;jsessionid=0AC28F3B54412639DF5](http://www.gadetec.es/web/guest/fija_alumina;jsessionid=0AC28F3B54412639DF5)



B6926D359C77A?p\_p\_id=56\_INSTANCE\_7i2f&p\_p\_lifecycle=0&p\_p\_state=normal&p\_p\_mode=view&p\_p\_col\_id=column-1&p\_p\_col\_pos=2&p\_p\_col\_count=3&page=4. [Accessed: 18-Aug-2014].

- [38] (Real Academia Española), *Adsorción*, Página Web. RAE, 2014.
- [39] R. T. Yang, *Adsorbents: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, 2003, p. 424.
- [40] eCompressedAir, “Van Air D-72 Freedom Single Tower Deliquescent Air Dryer,” 2014. [Online]. Available: <http://www.ecompressedair.com/air-dryers/deliquescent/van-air-freedom-d-72-dryer.aspx>. [Accessed: 18-Aug-2014].
- [41] AREMCO, “Pyro-Paint™ 634-AL High Temp Refractory Coating,” 2014. [Online]. Available: <http://www.aremco.com/news-item/new-pyro-paint?-634-al-high-temp-refractory-coating/>. [Accessed: 18-Aug-2014].
- [42] (Zhengzhou Tianma Micropowder co Ltd), “TM-WA Series White Fused Alumina Abrasive,” *getit tradeget.com empowering your business*. [Online]. Available: <http://www.tradeget.com/listing/zhengzhou-tianma-micropowder-co-ltd/product-services-detail/289784/235763/1/>. [Accessed: 18-Aug-2014].
- [43] (Christy Catalytics), “Custom Crafted (TM) Hexagonal Target Tile,” *Christy Catalytics*, 2014. [Online]. Available: <http://www.christycatalytics.com/products/hexagonal-target-tile/>. [Accessed: 18-Aug-2014].
- [44] (Xieta International S.L.), “Bolas de Alúmina para soportes de Catalizadores petroquímicos e industria de Fertilizantes Xieta International, S.L.” [Online]. Available: <http://www.xieta.com/index.php/es/productos/bolas-de-alumina-xieta-99>. [Accessed: 03-Aug-2014].
- [45] (Xieta International S.L.), “Piezas Especiales de Alúmina Anti-Desgaste para Todo Tipo de Industrias Xieta International.” [Online]. Available: <http://www.xieta.com/index.php/es/productos/piezas-especiales-de-alumina-anti-desgaste-xieta>. [Accessed: 18-Aug-2014].
- [46] E. Bou, R. Pérez, S. Arrufat, and G. Atichian, “Influence of alumina characteristics on glaze properties,” *Boletín la Soc. Española Cerámica y Vidr.*, pp. 271–278, 2010.
- [47] ESTIIC, “Aplicaciones Industriales de la Nanotecnología,” Asturias - España, 2012.

- [48] C. F. Guitiérrez Gonzáles, “Nuevos Materiales Cerámica – Niobio con Aplicaciones Biomédicas,” Universidad Autónoma de Madrid, 2009.
- [49] C. H. Martínez and F. Moreno, “Biocompatibilidad,” *Colomb. aprende, la Red Conoc.*, pp. 1–5, 1987.
- [50] R. Clavijo Puyana, “Coronas Cerámicas,” *Clínica Rehabilitación Oral Avanzada en Colombia*, 2010. [Online]. Available: <http://www.robertoclavijopuyana.nom.co/category/consultorio-dental/>.
- [51] (NTK Cutting Tools), “Alumina Based Ceramics (White Ceramics),” 2014. .
- [52] (NTK Cutting Tools), “Alumina TiC-Based Ceramics (Black Ceramics),” 2014. .
- [53] R. Ordoñez Aragón, “Depositos de Bauxita en el Norte del Cauca como Base para la Industria del Aluminio, Química, y de Abrasivos y Refractarios,” 1969.
- [54] N. Camacho, “Plan Nacional Minero-Bauxita,” Bogotá, Cundinamarca, Colombia, 1985.
- [55] C. Alarc, “Caracterización preliminar de arcillas bauxíticas de la verde mesitas, municipio de Aipe, departamento del Huila,” vol. 4, no. 1, pp. 3–9, 2006.
- [56] J. I. Tobon and L. M. Montoya, “Análisis Comparativo entre Algunas Materias Primas Minerales Nacionales e Importadas Utilizadas en la Industria del Cemento,” *Ciencias la Tierra*, vol. 19, 2006.
- [57] C. Vargas Nieto, J. G. Carriazo, and E. Castillo, “Estudio de materiales adsorbentes de bajo costo para remover Cr(VI) de efluentes acuosos,” *Ing. e Investig. Fac. Ing. Univ. Nac. Colomb.*, vol. 31, 2011.
- [58] C. Caballero Badillo, “Resurgiendo de las cenizas,” *Ciencia al día AUPEC*. [Online]. Available: <http://aupec.univalle.edu.co/informes/junio97/boletin40/cenizas.html>. [Accessed: 24-Aug-2014].
- [59] L. F. Conde Lasso and M. Narvaez Silva, “Informe Minero del Municipio de Aipe,” 2008.
- [60] R. Salinas, C. Rodriguez, H. Lozano, H. Mendoza, and F. Solano, “Mapa metalogénico de Colombia.” 1999.

- [61] M. de M. y E.-M. de M. Ambiente, “Construcción, Momtaje y Obras y Trabajos de Explotación,” *Guía Min. Ambient. Explot.*
- [62] Ingeominas, “Muestras de Bauxitas.” Medellín, Antioquia, Colombia, 2014.
- [63] Ministerio de Minas y Energía, “Censo Minero Departamental Colombiano.” .
- [64] UPME, “Indicadores de la minería en Colombia,” 2010.
- [65] UPME, “Marco Legal Minero,” 2014. [Online]. Available: [http://www.upme.gov.co/guia\\_ambiental/carbon/gestion/politica/marco/marco.htm](http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/politica/marco/marco.htm). [Accessed: 24-Aug-2014].
- [66] A. Martínez Ortiz, “Impacto socioeconómico de la minería en Colombia,” Bogotá, Cundinamarca, Colombia, 2012.
- [67] (DIAN), “List of supplying markets for a product imported by Colombia.” .
- [68] A. Martínez Ortiz, “Estudio sobre los impactos socio-económicos del sector minero en Colombia : encadenamientos sectoriales,” Bogotá, Cundinamarca, Colombia, 2013.
- [69] (Banco de la República - Colombia), “Índice de Producción Real de la Industria Manufacturera Colombiana.” 2014.

