

Tratamiento de residuos mineros almacenados a la intemperie de la empresa Minera Reina de Oro del municipio de Vetas, mediante espirales Humphreys

Fabián Enrique Corredor Romero

Iván Alexander Jaimes Morantes

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Walter Pardavé Livia

MSc en Ingeniería Metalúrgica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Primeramente a Dios porque estoy seguro que su mano intercedió más de una vez en la culminación de esta etapa de mi vida.

A mis padres Luis Enrique y Gladys quienes a pesar de las dificultades nunca renunciaron, ni dejaron de creer en mí, siendo siempre una voz de aliento y fortaleza que nunca decayó.

A mi tía Vicky y a mi nona Lola, que siempre han estado dispuestas a ayudarme en todo cuanto esté a su alcance para el cumplimiento de mis sueños.

Finalmente a todos mis amigos, compañeros y conocidos, mi compañero de proyecto Iván, el zorro, el vulgar, los miembros de Egresados y La Delincuencia quienes de una u otra forma estuvieron involucrados en la terminación de esta carrera; pero especialmente a mi mejor amiga Paola quien se convirtió en mi más grande apoyo durante el periodo más difícil de esta etapa y una de las principales responsables de que no tirara la toalla y renunciara; a todos ustedes, Gracias.

Fabián Enrique Corredor Romero

Principalmente a Dios, sin él esto hubiese sido imposible, a mi madre Ofelia Morantes quien ha dedicado mucho tiempo de su vida a mi formación, a mis hermanos Erika Consuelo y Carlos Ariel por su apoyo y cariño, a mis hijas Daniela, Mariana y Gabriela quienes son mi mayor fuente de motivación, y muy especialmente a mi esposa María Fernanda quien ha sido pilar fundamental en la iniciación y culminación de este proyecto de vida, por su amor incondicional, por su compañía, comprensión y apoyo en todo momento, principalmente en los más difíciles, gracias por estar ahí para el cumplimiento de este sueño.

Finalmente, gracias a mi compañero de proyecto Fabián Enrique “Topo”, a mis compañeros y amigos; a todos ustedes, Gracias.

Iván Alexander Jaimes Morantes

Agradecimientos

Al profesor Walter, quien confió en nosotros y siempre estuvo disponible con miras a sacar adelante el proyecto.

A todos los técnicos y personal de la universidad quienes facilitaron el desarrollo del proyecto con sus contribuciones, Pedro Caldas, Javier Gaitán, Ambrosio Carrillo “padrecito” y a la Mechua’; no se hubiera podido terminar el trabajo sin ellos.

A la empresa minera Reina de Oro quienes nos facilitaron adentrarnos a profundidad en su proceso y aprender de él.

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Referencial.....	17
2.1 Estado del arte.....	17
2.2 Pasivos ambientales mineros	18
2.3 Separación gravimétrica de minerales	19
2.4 Antecedentes	20
3. Metodología experimental	21
3.1 Muestreo de relaves	21
3.2 Caracterización física de relaves.....	22
3.2.1 Ensayo del frasco de Le Chatelier.	22
3.2.2 Caracterización granulométrica.	23
3.3 Caracterización química de relaves	25
3.3.1 Ensayo al fuego.....	26
3.3.2 Ensayo de microscopia SEM-EDS.	27
3.4 Concentración a través del espiral Humphrey	27

3.5 Preparación del concreto para fabricación de probetas.....	29
3.5.1 Caracterización granulométrica de la arena.....	31
3.5.2 Prueba de impurezas orgánicas.....	32
4. Resultados.....	34
4.1 Ensayos al fuego a cada concentrado del espiral.....	34
4.2 Ensayo de resistencia a la compresión a probetas de concreto.....	36
5. Conclusiones.....	38
6. Recomendaciones.....	39
Referencias Bibliográficas.....	40
Apéndices.....	42

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Modelo de Schuhmann para relaves</i>	25
Tabla 2. <i>Modelo de Rosin-Rammler para relaves</i>	25
Tabla 3. <i>Tenor de oro presente en los relaves sin concentrar</i>	27
Tabla 4. <i>Resistencia a la compresión del concreto según su clasificación</i>	30
Tabla 5. <i>Composición propuesta para fabricar 1 m³ de concreto tipo D</i>	30
Tabla 6. <i>Modelo de Schuhmann para arenas</i>	32
Tabla 7. <i>Modelo de Rosin-Rammler para arenas</i>	32
Tabla 8. <i>Porcentaje de recuperación, razón de concentración y razón de enriquecimiento de cada una de las pruebas en el espiral</i>	36
Tabla 9. <i>Promedio de resistencias a la compresión desarrolladas por los 2 bloques de probetas a diferentes edades de curado</i>	37
Tabla 10. <i>Resistencia a la compresión desarrollada por las probetas con acelerante</i>	38

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Escombrera de la minera Reina de Oro en el municipio de Vetas	15
<i>Figura 2.</i> Ensayo frasco de Le Chatelier.	23
<i>Figura 3.</i> Análisis granulométrico con tamices ASTM.....	24
<i>Figura 4.</i> % Pasante vs tamaño de partícula para relaves.....	24
<i>Figura 5.</i> Colada de botón de plomo y copelas una vez reducido el plomo.	26
<i>Figura 6.</i> Atributos del diseño experimental.	28
<i>Figura 7.</i> Colas, mixtos y concentrados en el espiral	29
<i>Figura 8.</i> % Pasante vs tamaño de partícula para arena	31
<i>Figura 9.</i> Fabricación y curado de probetas	33
<i>Figura 10.</i> Matriz propuesta para el ensayo en el espiral	34
<i>Figura 11.</i> Máximos y mínimos óptimos para aumentar la recuperación	35
<i>Figura 12.</i> Diagrama de Pareto estandarizado para recuperación	35
<i>Figura 13.</i> Ensayo a compresión de probetas de concreto	36
<i>Figura 14.</i> Modelos experimentales de cada composición para el desarrollo de su resistencia...37	

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Resultados de SEM-EDS	42
Apéndice B. Análisis Statgraphics.....	50
Apéndice C. Prueba de impurezas orgánicas	53
Apéndice D. Valores de resistencia del concreto.....	54

Resumen

TÍTULO: Tratamiento de residuos mineros almacenados a la intemperie de la empresa minera reina de oro del municipio de vetas, mediante espirales Humphreys*

AUTORES: Corredor Romero Fabián Enrique, Jaimes Morantes Iván Alexander**

PALABRAS CLAVE: Relaves mineros, espiral Humphreys, pasivo ambiental minero, separación gravimétrica.

DESCRIPCIÓN:

Durante mucho tiempo los procesos mineros han sido indispensables para la sociedad actual, sin embargo estos tienen el inconveniente de generar residuos potencialmente peligrosos conocidos como pasivos ambientales mineros, con el objetivo de buscar aplicaciones útiles para estos residuos se da inicio al presente trabajo donde se busca incorporar los PAM producidos por la empresa minera Reina de oro del municipio de Vetas a los componentes para producir concreto reforzado tipo D. Se tomaron muestras de la pila residuos de la empresa y se caracterizaron física, química y granulométricamente, primero se realizaron pruebas SEM-EDS y FRX para obtener la composición elemental en porcentaje en peso del relave y luego mediante ensayos al fuego determinar el tenor de oro presente en ellos, también se midió la densidad específica de los relaves, y una prueba para medir la cantidad de impurezas orgánicas presentes en los relaves. Posteriormente mediante tamices ASTM se realizó la separación granulométrica y luego se sometieron los relaves a un proceso de concentración gravimétrica mediante un espiral Humphrey tomando diferentes variables operativas y se analizó su rendimiento mediante el software STATGRAPHICS CENTURION XVIII. Después con las colas producidas por el espiral se estableció la composición para fabricar probetas de concreto reforzado tipo D variando cada vez el porcentaje de colas presente ellas y luego mediante ensayos de compresión establecer su viabilidad para la producción de concreto apto y que cumpla con la norma del INVIAS INV E-410.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: MSc. Walter Pardavé Livia

Abstract

TITLE: Treatment of mining waste stored at the opening of the Reina de oro mining company of the municipality of Vetás, through Humphreys spirals.*

AUTHORS: Corredor Romero Fabián Enrique, Jaimes Morantes Iván Alexander**

KEYWORDS: Mining tilings, Humphreys spirals, enviromental mining liability, gravimetric separation.

Description:

For a long time mining processes have been indispensable for today's society, however they have the disadvantage of generating potentially hazardous waste known as mining environmental liabilities, in order to find useful applications for these wastes, the present work begins where incorporate the PAMs produced by the mining company Reina de oro of the municipality of Vetás to the components to produce reinforced concrete type D. Samples were taken from the company's waste pile and were characterized physically, chemically and granulometrically, first SEM-EDS and FRX tests were carried out to obtain the elemental composition in percentage by weight of the tailings and then by fire tests to determine the amount of gold present in them, the specific density of the tailings was also measured, and a test to measure the amount of organic impurities present in the tailings. Subsequently, using ASTM sieves, the granulometric separation was performed and then the tailings were subjected to a gravimetric concentration process using a Humphrey spiral taking different operating variables and its performance was analyzed using the STATGRAPHICS CENTURION XVIII software. Then, with the tails produced by the spiral, the composition for manufacturing reinforced concrete specimens type D was established, varying the percentage of tails present each time and then using compression tests to establish its viability for the production of suitable concrete that complies with the standard of INVIAS INV E-410.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: MSc. Walter Pardavé Livia

Introducción

Desde la primera incursión del hombre en el campo del extractivismo y la minería siempre ha existido la problemática sobre el que hacer con los residuos que dejan estos procesos, llamados recientemente PAM (Pasivos Ambientales Mineros), que no son otra cosa que la sobras y el material considerado no útil, o que por sus características no proporciona una capitalización adecuada, sin embargo, a pesar de no ser útiles en términos económicos estos si producen marcados impactos ambientales en el área donde se encuentran, tales como: drenajes ácidos de mina, retorno de aguas que contienen productos químicos nocivos a los acuíferos, erosión debido a relaves inestables y la desertificación por mencionar algunos, como lo mencionan Arango y Olaya(Arango & Olaya, 2012).

Actualmente la preocupación creciente por el cuidado del medio ambiente ha conllevado a la regulación de las leyes y a la búsqueda de alternativas de reciclaje que logren reducir al máximo posible los impactos ambientales negativos y transformen los PAM en productos útiles a la sociedad (Infante, 2011).

De acuerdo con lo anterior, han tomado un nuevo impulso los procesos de separación gravimétrica de minerales tales como mesas Wilfley, concentradores Knelson, espirales Humphreys, etc. los cuales en su funcionamiento solo necesitan de una corriente de agua, lo que reduce al mínimo el riesgo de contaminación por químicos en cuerpos acuíferos cercanos.

Partiendo de esta idea se propone este proyecto que busca darle una aplicación a los residuos sólidos cianurados que produce la empresa minera Reina de Oro del municipio de vetas y que son visibles en la figura 1, tratarlos mediante un separador en espiral Humphreys y con ellos producir

un material apto para conformar un agregado de concreto capaz cumplir la normas técnicas para la pavimentación de vías terciarias como la que une el municipio de Vetas (Santander) y el municipio de Berlín (Santander) que en este momento es una vía totalmente destapada y sin algún tipo de pavimento (Bouso, 1999)(Salas & Hinojosa, 2013)(Salas & Hinojosa, 2007) .



Figura 1. Escombrera de la minera Reina de Oro en el municipio de Vetas

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Extraer el contenido aurífero presente en los residuos mineros almacenados a la intemperie de la minera Reina de Oro, y producir con el material restante productos aptos para la aplicación en el área de la construcción.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar química, granulométrica y microscópicamente los relaves que se presentan como pasivos ambientales en la zona de influencia de la Minera Reina de Oro.
- Establecer las variables operativas como: flujo de pulpa, granulometría y apertura de rifles, y el circuito de tratamiento de los residuos mineros de Minera Reina de Oro de Vetas Santander, mediante espirales Humphreys.
- Obtener un agregado de construcción para realizar productos de pavimentación de vías, a partir de arenas provenientes de los relaves producidos en la Minera Reina de Oro que cumpla con las especificaciones técnicas ASTM y del INVIAS Colombia.

2. Marco Referencial

2.1 Estado del arte

El espiral de Humphreys es un dispositivo helicoidal introducido a la industria por primera vez en el año 1945. Desde ese año hasta el día de hoy los espirales siguen funcionando con base en el mismo principio, sin embargo se han presentado avances significativos en cuanto a los métodos de fabricación y los nuevos diseños más eficientes. Actualmente en la industria hay un extenso abanico de posibilidades en cuanto a espirales, las cuales estarán ligadas a los procesos característicos y al mineral a tratar. Los diseños más obsoletos constan de varias bocas de concentrado dispuestas a lo largo de la canaleta, y están ubicadas aproximadamente cada media vuelta cuidando siempre que antes de cada una se cuente con una inyección de agua que se encargara de empujar las arcillas presentes y lavando los concentrados (Bouso, 1999) (Salas & Hinojosa, 2007).

Las espirales más modernas cuenta con la enorme ventaja de que no necesitan aporte de agua (waterless) y aparte de eso operan a porcentajes de solidos mucho más elevados que las antiguas (30-50% frente al 15-30%). Además de eso poseen otra ventaja adicional, cuentan con cuchillas ajustables que se encargan de separar el concentrado, los estériles y las mezclas (Salas & Hinojosa, 2013).

Es posible además crear panales o bancos de Humphreys que formaran módulos con capacidad de procesamiento que fluctúan entre las 50 t/h hasta las 120 t/h, y que ocupan un espacio bastante

reducido. Estos constan de una instalación bastante sencilla y ágil, y además frente a otros equipos concentradores como mesas Wilfley la relación entre capacidad y área ocupada es mucho más eficiente en los panales de espirales (Salas & Hinojosa, 2013).

2.2 Pasivos ambientales mineros

Existen muchas definiciones sobre lo que es un PAM las cuales varían de acuerdo a cada país, según la legislación peruana, (está mucho mejor estructurada que la colombiana con respecto a minería) en el artículo de Gutiérrez (Gutiérrez, 2011) define los PAM como: “se define a los PAM de manera amplia como aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad”. Entre tanto en la legislación colombiana los PAM están definidos por la ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales) como: “Obligación legal, presente, de una empresa o persona natural de hacer un gasto futuro, debido a la ejecución de una actividad, uso, vertimiento o desecho de una sustancia en particular que afecta, daña o agota de manera peligrosa los recursos naturales y/o el ambiente”. Si bien notamos en ambas definiciones que la se trata de residuos potencialmente peligrosos para el ambiente y que deben ser controlados, lo que se traduce según Bailleti (Bailleti, 2009) en minas, escombreras, socavones abandonados, que son los causantes de los mayores productos contaminantes y alterantes del medio cercano los cuales pueden ser:

- Contaminación de aguas superficiales y subterráneas.
- Contaminación de suelos de la zona de influencia de estos depósitos.
- Impacto visual negativo.

- Riesgo continuo de daños al ecosistema frente a los desastres naturales.
- Presencia de metales pesados en el medio físico.

Según lo señala Infante (Infante, 2011) debido a los altos índices de corrupción y del ineficiente sistema legal colombiano únicamente las grandes empresas mineras cumplen con los requisitos exigidos por las autoridades, sin embargo la alta proliferación de minería artesanal y socavones clandestinos sin ningún tipo de control son el principal causante de la contaminación por minería, lo cual ha generado en la población la demonización de la minería, lo que no ocurre en países como Perú o Chile.

2.3 Separación gravimétrica de minerales

Los procesos de separación gravimétrica se fundamentan en la diferencia de pesos específicos de los compuestos y materiales a separar, dada su facilidad y la poca demanda de recursos que requieren en comparación a otros métodos más complejos, son el medio de separación más usado a nivel mundial.

De acuerdo al proceso mecánico de su funcionamiento los procesos de separación de pueden clasificar en:

- Inmersión en medio denso, aquí las partículas más ligeras flotan mientras que las más pesadas se hunden tal como ciclones, tambores y platos.
- Corrientes verticales pulsantes, que basan su funcionamiento en la velocidad más alta de descenso de las partículas más pesadas con relación a las más ligeras, se usan dispositivos como jigs y cajas hidrodinámicas.

- Película líquida, donde los materiales dependiendo de su densidad avanzan a diferentes velocidades estableciendo perfiles de concentración, como sucede con los conos Reicher, **espirales Humphreys**, mesas Wilfley y concentradores centrífugos.

A la hora de elegir un dispositivo es necesario tener en cuenta algunas variables según las cuales se podrá optimizar el proceso, estas pueden ser: porcentaje de sólidos, diferencia mena-ganga, tamaño de grano, etc. Sin embargo es crucial el tamaño de las partículas a tratar, de acuerdo a esto la selección óptima es la siguiente:

- (100mm>X>20mm) cajas de pulsación neumática, jigs de pulsación hidráulica, tambores y platos de medio denso.
- (20mm>X>2mm) concentradores centrífugos, hidrociclones y jigs especiales.
- (X<2mm) **espirales Humphreys**, mesas Wilfley, jigs de columna y conos Reichert.

2.4 Antecedentes

Dada la problemática que rodea a los pasivos ambientales mineros se han propuesto investigaciones con el fin de darles un uso adecuado y reducir los impactos al medio ambiente al mínimo posible. En ese orden de ideas, Félix Cárdenas (CÁRDENAS, 2019) en su trabajo se enfoca en buscar la fabricación de bloques de concreto estructural usando relaves de la unidad minera Mercedes 3, en el Perú. Establece el diseño por dosificación de material y luego se desarrolla la mezcla mediante el método ACI (American Concrete Institute) con el que construye los bloques de 39cm X 19cm X 14cm usando 3 dosificaciones diferentes, finalmente realiza pruebas de compresión y determina la viabilidad además de encontrar un ahorro monetario del 11% en el costo de los bloques de relave con relación a los bloques convencionales.

También Alfonso Romero y Silvana Flórez (ROMERO, Alfonso; FLORES, Silvana, 2010) estudiaron el posible uso de relaves mineros en el Perú para la fabricación de baldosas y ladrillos dado que existen cerca de 450 minas metálicas en estado de abandono y hay una necesidad de darle un uso adecuado a estos residuos. Ellos proponen un tratamiento del relave en donde se realiza una fijación química que inmoviliza e insolubiliza los metales pesados que puedan estar presentes. Posteriori indican un proceso donde se elaboran ladrillos y baldosas con el relave tratado el cual consigue producir un agregado de construcción que cumple con los requisitos exigidos por la legislación peruana.

3. Metodología experimental

Para llevar a cabo los objetivos propuestos fue necesario realizar una serie de actividades y procesos que se listan a continuación:

3.1 Muestreo de relaves

Este proceso es realizado enteramente por el personal de la minera reina de oro y lo llevan a cabo en varios pasos, primero el mineral proveniente de la mina alimenta pasa por 2 procesos de reducción de tamaño en trituradoras de mandíbulas, luego el mineral triturado pasa a un molino de bolas que posteriormente descarga en un separador rotatorio (trommel) que envía los finos a un

concentrador de corrientes pulsantes (jig), el cual a su vez descarga en una mesa de sacudidas Wilfley, acto seguido los concentrados de la mesa se someten a pandeo y luego a fundición.

Por otro lado los mixtos y colas de la mesa pasan a una nueva molienda y a otra mesa secundaria, pero en este caso los medios de la mesa se someten a cianuración y precipitación con polvo de zinc, mientras que las colas en este punto ya se consideran desecho y son arrojadas a una pila de relaves a la intemperie, estos últimos son la materia prima de este proyecto.

Para garantizar una muestra representativa, se realizaron diferentes tomas en varios puntos de la pila con una barrena, cada toma de aproximadamente 500 gramos variando la profundidad de 0 a 2 metros y desplazándose alrededor de 3 metros entre cada toma.

3.2 Caracterización física de relaves

Como parte de la caracterización física, se realizaron 2 ensayos necesarios para determinar la aptitud de los relaves como agregados para concreto.

3.2.1 Ensayo del frasco de Le Chatelier. Para efectos del conformado del concreto es indispensable conocer la densidad de sus agregados, mediante este sencillo ensayo es posible determinarla, en un frasco de Le Chatelier estandarizado, como el de la figura 2, se agrega aceite de almendras hasta una medida y que será la toma base, luego se agrega la cantidad seleccionada de relaves mediante un embudo largo y se procede a revisar cual fue el volumen desplazado y finalmente calcular la densidad específica del relave, dando como resultado una densidad específica de: **2,74 g/cm³**

$$Densidad\ real = \left(\frac{masa\ del\ relave}{volumen\ desplazado} \right)$$



Figura 2. Ensayo frasco de Le Chatelier.

3.2.2 Caracterización granulométrica. Para la determinar si es posible el uso de los relaves como agregado fino en la composición de concreto y posteriormente para determinar las proporciones idóneas de cada componente del mismo, es necesario realizar un análisis granulométrico, el cual se llevó a cabo haciendo pasar una muestra de 100g a través de 9 tamices certificados por ASTM como malla: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 y 200 como se observa en la figura 3. Luego se ajustaron los datos según la distribución de Schuhmann, $F(X) = 100\left(\frac{X}{X_0}\right)^a$, y Rosin-Rammler, $F(X) = 100 - 100e^{-\left(\frac{X}{X_r}\right)^m}$.



Figura 3. Análisis granulométrico con tamices ASTM

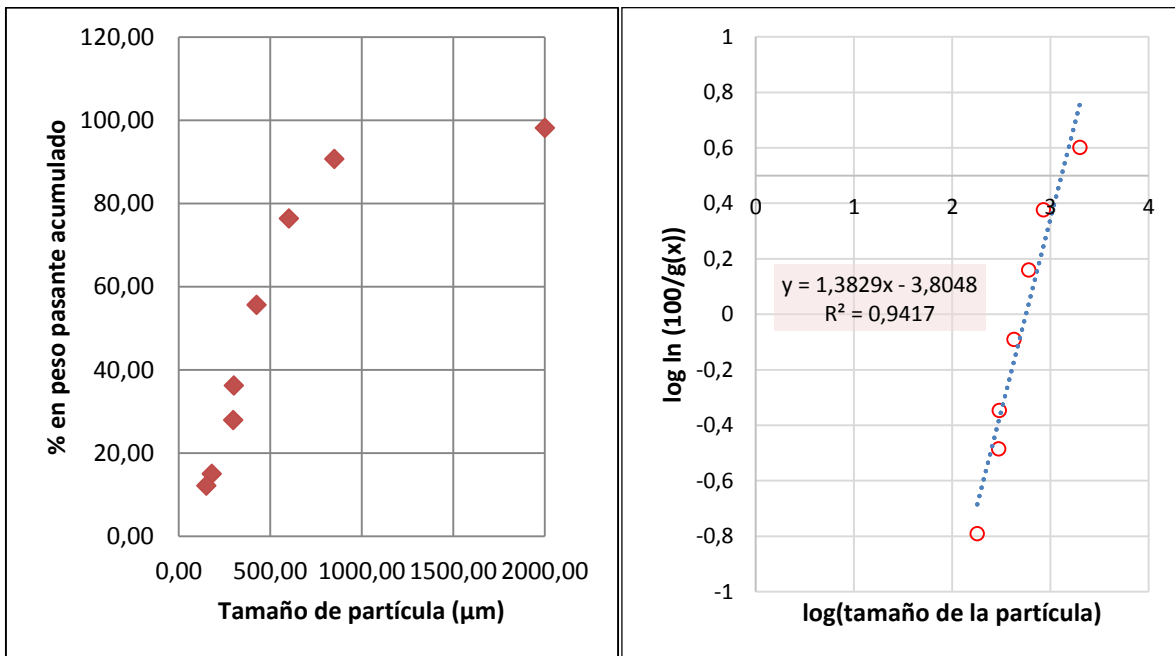


Figura 4. % Pasante vs tamaño de partícula para relaves.

Tabla 1.

Modelo de Schuhmann para relaves

• Variable	• Valor	• Unidades
• b	• -0,4304	• -
• Log (100)	• 2	• -
• X ₀	• 1260,07	• μm
• a	• 0,7839	• -
• P ₈₀	• 80,00	• %
• P ₈₀	• 947,915152	• μm
• Malla 20	• 850	• μm

Tabla 2.

Modelo de Rosin-Rammler para relaves

• Variable	• Valor	• Unidades
• b	• -3,8048	• -
• a	• 1,3829	• -
• X _R	• 564,0527	• μm
• P ₈₀	• 80,00	• %
• P ₈₀	• 656,4521173	• μm
• Malla 30	• 600	• μm

Se observa un pasante de 80% en la malla 30, la cual equivale a 600 micrómetros

3.3 Caracterización química de relaves

Para determinar las características químicas de los relaves se realizaron los 2 ensayos siguientes:

3.3.1 Ensayo al fuego. Se realizaron ensayos al fuego a los relaves en bruto y separados según su granulometría para determinar el contenido de oro presente en ellos. Consistió en tomar una muestra representativa de 30g la cual es sometida a tostación a 750°C durante 30 minutos para luego mezclarse en un crisol con 45g de litargirio (PbO), 1g de sal (NaCl), 5g de harina de trigo y 30g de carbonato de calcio (CaCO_3), esta mezcla es introducida en una mufla Terrigeno D8 a 1000°C por 30 minutos hasta su fusión para luego ser colada en lingoteras. Una vez solidificado, se procede a separar el botón de plomo de la escoria de naturaleza vítrea, luego de la separación el botón de plomo se ubica en una copela a base de hueso triturado y se introduce en mufla a 900°C , durante el calentamiento la copela absorbe todo el plomo dejando únicamente un pequeño botón de oro y plata sobre ella como se muestra en la figura 5. Ya con los metales preciosos seleccionados el paso siguiente es disolver la plata presente sumergiendo el botón en soluciones de ácido nítrico a diferentes concentraciones hasta que únicamente queda oro puro presente en los pequeños crisoles de joyería el cual es pesado en una balanza RADWAG XA210.3Y de alta precisión y finalmente se calcula el contenido de oro presente en los relaves.



Figura 5. Colada de botón de plomo y copelas una vez reducido el plomo.

Tabla 3.

Tenor de oro presente en los relaves sin concentrar

	• Relaves en bruto	• Medios (-50 +70)	• Finos (-70 +100)
• Oro presente (g/Tn)	• 3,1	• 3,6	• 3,8

3.3.2 Ensayo de microscopia SEM-EDS. Se trata de un método complementario entre si realizado en los laboratorios especializados de la Universidad Industrial de Santander en Guatiguará como lo muestra el apéndice A, primeramente el SEM entrega una imagen obtenida mediante barrido de electrones del mineral que permite seguidamente seleccionar los puntos críticos a donde se apuntaran los rayos del EDS para obtener las composiciones específicas en estos. Se seleccionaron 6 puntos críticos a analizar obteniendo un porcentaje de 66,52% de óxido de silicio (SiO_2), 2,59% de hierro, 1,96 de azufre y 0,01% de cobre, además mediante su espectro fue posible detectar algunas presencias significativas de silicio, hierro, manganeso y titanio formando óxidos y sulfuros.

3.4 Concentración a través del espiral Humphrey

Para la realización de las pruebas con el espiral de 6 vueltas disponible en la planta de aceros de la UIS, visible en el apéndice B, se seleccionaron 3 variables a tener en cuenta: flujo de pulpa, apertura de los reflex y granulometría del mineral.

Una vez establecidas las variables, se aplicó el software STATGRAPHICS CENTURION XVIII para el diseño adecuado del modelo de experimento a seguir. Se seleccionó un diseño de

cribado factorial con 3 factores experimentales y una variable de respuesta, los atributos del diseño en la figura 6, indican que es necesario realizar 8 pruebas variando en cada una los factores experimentales. Para todas las pruebas se trabajó una pulpa al 2% de porcentaje en sólidos.

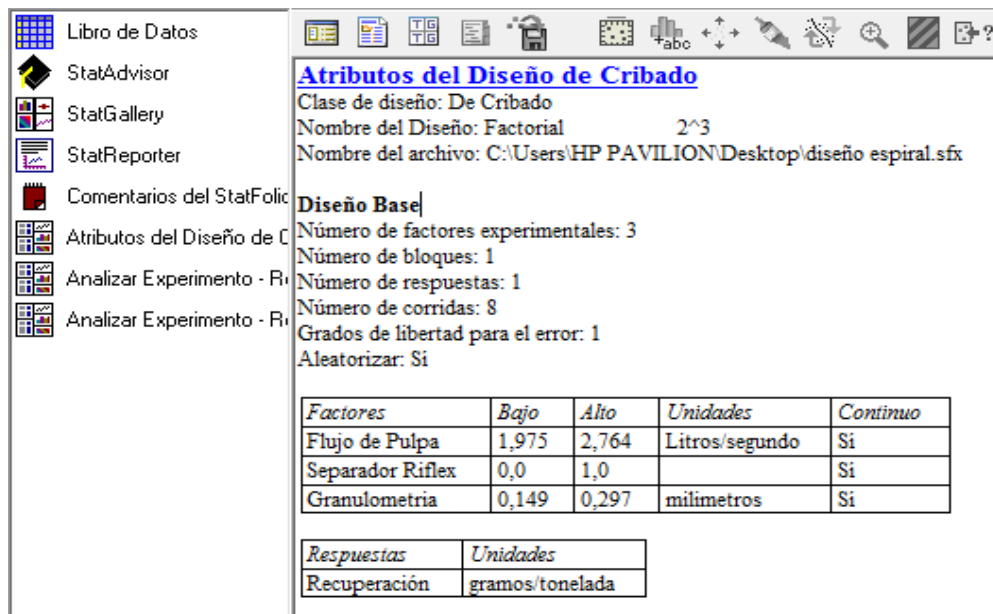


Figura 6. Atributos del diseño experimental.

Para el diseño del procedimiento es necesario establecer valores máximos y mínimos para cada uno de los factores experimentales, en este caso el flujo de pulpa fue establecido con la mínima potencia que entrega la bomba adaptada del hidrociclón presente la planta de aceros de la Universidad Industrial de Santander y el máximo como el flujo donde la pulpa empieza a derramarse por las paredes del espiral. El separador reflex a tener en cuenta fue el que controla los mixtos, para efectos del diseño se tomó como 1 el rifle totalmente abierto y como 0 el rifle totalmente cerrado, En la figura 7 se observa el perfectamente el perfil de colas, mixtos y concentrados a través del espiral. En cuanto a la granulometría, se optó por un tamaño de partículas máximo de 0,297mm que es el equivalente al pasante malla 50 y un valor mínimo de 0,149mm

que corresponde al retenido en malla 100. A pesar de que las fuentes teóricas sitúan el rango de acción de los espirales a un tamaño de partícula de máximo pasante malla 10 (2mm) y mínimo de retenido malla 200, se eligieron las anteriormente mencionadas previas recomendaciones de los técnicos encargados con el fin de evitar posibles atascos en la bomba.



Figura 7. Colas, mixtos y concentrados en el espiral

Una vez obtenidos los concentrados de cada una de las 8 pruebas se procedió a extraer el agua a través de un filtro-prensa y posterior secado en estufa MEMMERT. Ya con el mineral seco se procede a realizar ensayos al fuego a cada una de las muestras para determinar el contenido de oro presente y establecer cuál fue la mejor combinación de variables.

3.5 Preparación del concreto para fabricación de probetas

Con miras al cumplimiento de los objetivos propuestos, el INVIAS indica que la construcción de placa huella para carretera terciaria debe realizarse usando concreto tipo D el cual debe cumplir con una resistencia mínima a la compresión establecida por la **norma INV E-410**

Tabla 4.

Resistencia a la compresión del concreto según su clasificación

Tipo de concreto	Resistencia mínima a la compresión en 28 días
Concreto pre-tensado y post-tensado	
A	4958
B	4551
Concreto reforzado	
C	3982
D	3100
E	2489
Concreto simple	
F	1991
Concreto ciclópeo	
G	1991

Nota. Adaptado de: Norma INV E-410

Teniendo esto en cuenta se revisa la norma ACI 211.1, la cual establece el proporcionamiento de cada uno de los componentes del concreto, se define la composición para preparar 1 m³ de concreto fresco en la tabla 5.

Tabla 5.

Composición propuesta para fabricar 1 m³ de concreto tipo D

Material	Cantidad
Agua [l]	200
Cemento [Kg]	375
Agregado grueso [Kg]	1050
Agregado fino (colas espiral + arenara La peña) [kg]	750
Relación agua/cemento	0,53

En este caso los relaves harán parte de los agregados finos junto con arena fina, la relación entre arena fina y relaves será la única variable a tener en cuenta al momento de definir la resistencia de las probetas. Los porcentajes seleccionados fueron 0%, 10%, 50%, 90% y 100%. Por esto es necesario caracterizar también las arenas a usarse, que en este caso aprovechando la cercanía al municipio de Vetas, serán provenientes de la arenera “La Peña” dado que reducirían los costos de transporte.

Se realizó una caracterización granulométrica y además, dado que la arena es extraída a cielo abierto con un método poco tecnificado se realizara una prueba de contenido de impurezas orgánicas las cuales pueden afectar el rendimiento del concreto.

3.5.1 Caracterización granulométrica de la arena. Se realiza una caracterización idéntica a la realizada a los relaves.

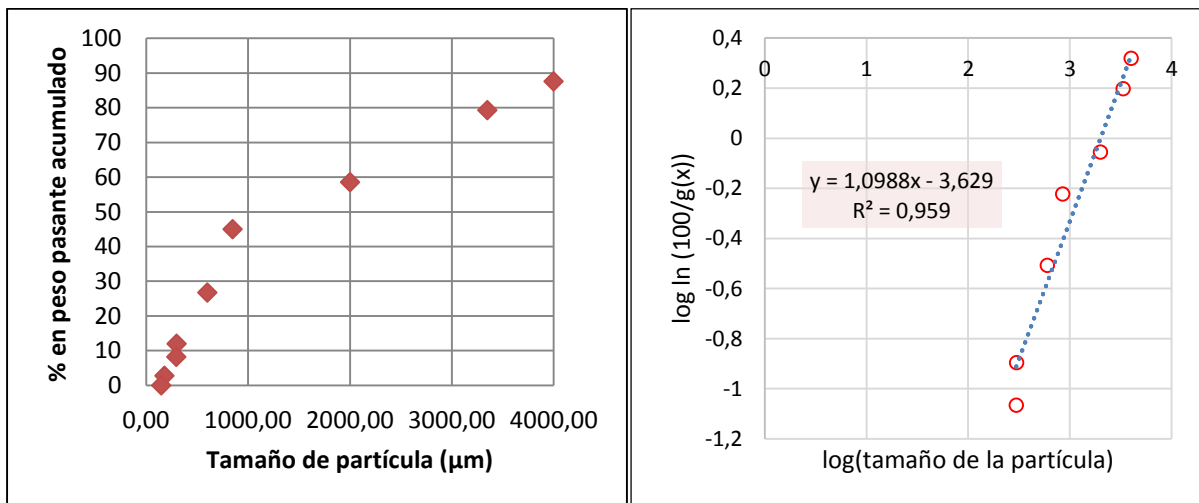


Figura 8. % Pasante vs tamaño de partícula para arena

Tabla 6.

Modelo de Schuhmann para arenas

• Variable	• Valor	• Unidades
• b	• -1,4842	• -
• Log (100)	• 2	• -
• X ₀	• 3439,8602	• μm
• a	• 0,9852	• -
• P ₈₀	• 80,00	• %
• P ₈₀	• 2742,67916	• μm
• Malla 8	• 3335	• μm

Tabla 7.

Modelo de Rosin-Rammler para arenas

• Variable	• Valor	• Unidades
• b	• -3,629	• -
• a	• 1,0988	• -
• X _R	• 2006,5658	• μm
• P ₈₀	• 80,00	• %
• P ₈₀	• 2939,064429	• μm
• Malla 8	• 3335	• μm

3.5.2 Prueba de impurezas orgánicas. De acuerdo a la norma ASTM C87/C87M se realiza una prueba que consiste en agregar una muestra de agregado en un recipiente de vidrio transparente hasta aproximadamente el 60% y el restante llenarlo con solución de hidróxido de sodio al 3% luego agitar y dejar reposar durante un día entero, una vez finalizada la espera se compara el color del líquido contra una paleta de colores estandarizada por la ASTM como se ve en el apéndice C.

Ya establecida la viabilidad de las arenas y los relaves, se procede a la fabricación de 35 probetas cilíndricas de 300 milímetros de altura y 150 milímetros de diámetro según lo establece

la norma NTC 550 del 2000 (NORMA TECNICA COLOMBIANA. Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra. NTC 550; 2000) variando cada vez la composición de agregado fino, iniciando en un probeta con la totalidad de arena y finalizando en una con la totalidad de colas, además se prepararon 5 probetas adicionales, como se observa en la figura 9 con el fin de comparar el comportamiento del concreto a las cuales se agregó un aditivo para concreto Sikaset-L elaborado por la compañía Sika® el cual cumple con la norma NTC 1299 del 2008 (NORMA TECNICA COLOMBIANA. Concretos. Aditivos químicos para concreto. NTC 1299; 2008) y comparar contra las probetas estándar de 28 días.



Figura 9. Fabricación y curado de probetas

Finalmente se someten las probetas a prueba de compresión como indica la norma NTC 673 de 2010, mediante una prensa hidráulica ALFRED J. AMSLER Y CIA. SUIZA (79/191) Y se define si son aptas para su uso como concreto tipo D.

4. Resultados

Una vez finalizada las pruebas el paso siguiente es el análisis de los resultados.

4.1 Ensayos al fuego a cada concentrado del espiral.

Siguiendo el diseño del experimento propuesto, se realizaron 8 pruebas variando los 3 parámetros a tratar, en donde a cada concentrado se le determinó el tenor de oro presente mediante ensayo al fuego mostrando los resultados de la figura 10

	BLOQUE	Flujo de Pulpa	Separador Reflex	Granulometria	Recuperación	Col_6
		Litros/segundo		milímetros	gramos/tonelada	
1	1	2,764	0	0,297	4,667	
2	1	1,975	0	0,149	4	
3	1	2,764	0	0,149	2,667	
4	1	1,975	1	0,149	3,667	
5	1	2,764	1	0,297	3,667	
6	1	1,975	1	0,297	2,667	
7	1	2,764	1	0,149	3,667	
8	1	1,975	0	0,297	5,667	
9						

Figura 10. Matriz propuesta para el ensayo en el espiral

Con los datos obtenidos y mediante el software STATGRAPHICS CENTURION XVIII se analizaron los resultados con el fin de encontrar la combinación más óptima y cuál de los

parámetros a tratar tiene mayor influencia en la recuperación final, arrojando la siguiente matriz y el respectivo diagrama de Pareto.



Figura 11. Máximos y mínimos óptimos para aumentar la recuperación

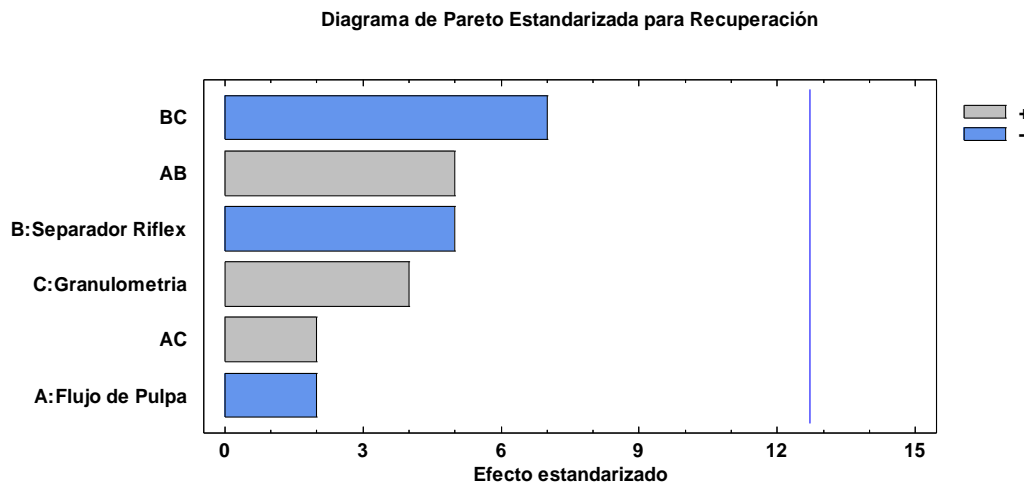


Figura 12. Diagrama de Pareto estandarizado para recuperación

Además con los valores óptimos, se obtienen las superficies de respuesta que muestran cual es el comportamiento de la recuperación en relación a la variación de los factores (ver apéndice) adicional a esto también se calculó el porcentaje de recuperación, la razón de concentración y la razón de enriquecimiento para cada prueba, la cuales están consignados en la tabla 8.

Tabla 8.

Porcentaje de recuperación, razón de concentración y razón de enriquecimiento de cada una de las pruebas en el espiral

	1	2	3	4	5	6	7	8
% Recuperación	83,8	79,1	56,2	89,3	94,6	69,2	89,7	48,9
Razón de concentración	1,54	1,33	1,25	1,08	1,08	1,07	1,07	3,22
Razón de enriquecimiento	1,29	1,05	0,70	0,96	1,02	0,74	0,96	1,57

4.2 Ensayo de resistencia a la compresión a probetas de concreto.

Tomando los porcentajes seleccionados y basándose en la norma NTC 673 del 2010 que sugiere fabricar entre 2 y 3 probetas de cada tipo para minimizar el riesgo de error, se crearon 2 bloques de 15 probetas cada uno, siendo 3 probetas para cada composición las cuales fueron comprimidas a 3 edades diferentes de 7, 15 y 28 días como se observa en la figura 13.



Figura 13. Ensayo a compresión de probetas de concreto

Tabla 9.

Promedio de resistencias a la compresión desarrolladas por los 2 bloques de probetas a diferentes edades de curado

Días de curado	Probeta 0%	Probeta 10%	Probeta 50%	Probeta 90%	Probeta 100%
7	2861,46	2590,57	2846,17	3234,83	1982,59
15	4564,68	2833,87	4605,47	5117,01	2574,40
28	4897,43	3285,90	4947,89	5412,50	2885,89

En la figura 14 se muestra el desarrollo de la resistencia del concreto de acuerdo al modelo experimental propuesto para cada uno de los porcentajes. La tabla 9 expandida está disponible en el apéndice D, así como los modelos logarítmicos experimentales para cada porcentaje de colas.

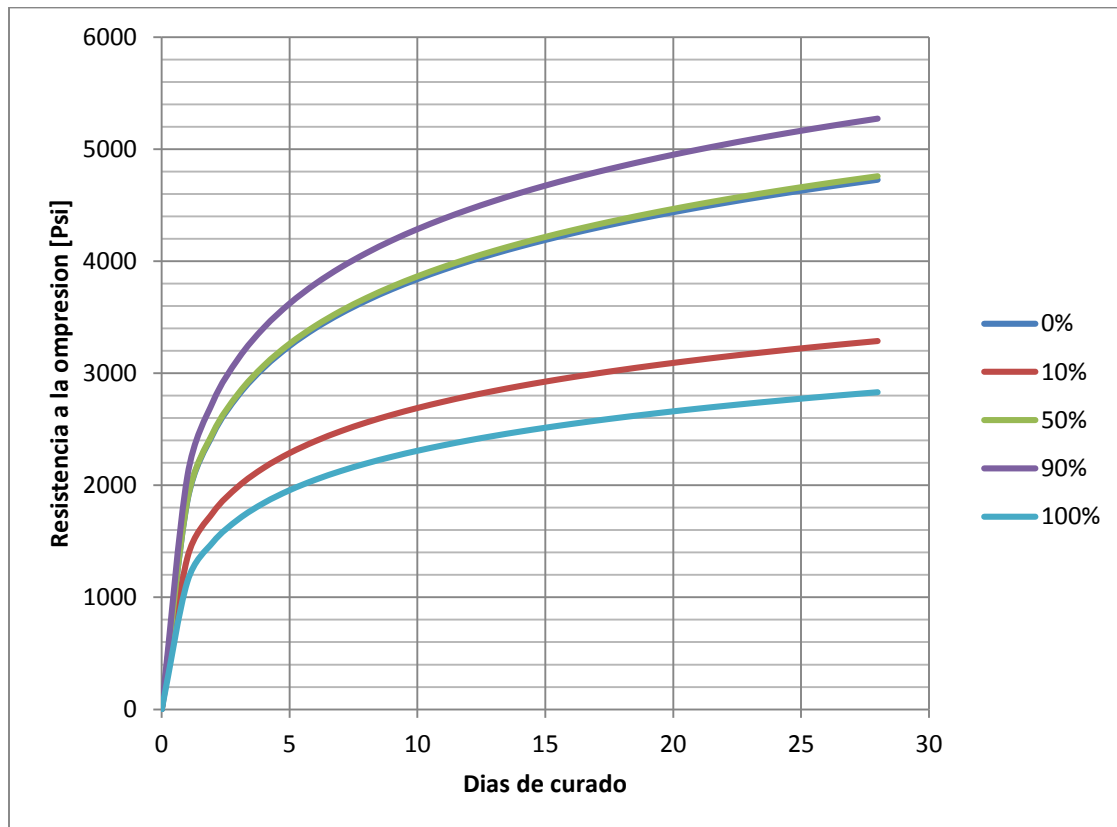


Figura 14. Modelos experimentales de cada composición para el desarrollo de su resistencia

De acuerdo a esto, existen 3 composiciones de relave que alcanzan los 3100 psi exigidos por el INVIAS para la construcción de placa huellas, sin embargo la muestra al 10% tarda por lo menos 20 días en desarrollar una resistencia aceptable, motivo por el cual se recomienda el uso de las composiciones 90% y 50% dado que ambas cumplen con la resistencia requerida.

Por otro lado las 5 probetas a las que se aplicó el acelerante Zikaset-L, no desarrollaron la resistencia esperada, ver tabla 10, siendo algunas incluso inferiores a las probetas sin aditivo, por lo que no se recomienda el uso de este aditivo en la preparación de este tipo de concreto.

Tabla 10.

Resistencia a la compresión desarrollada por las probetas con acelerante

Probeta 0%	Probeta 10%	Probeta 50%	Probeta 90%	Probeta 100%
2308,76	2861,13	2876,72	2495,07	1679,25

5. Conclusiones

Se consiguió caracterizar el relave mediante los ensayos de fluorescencia de rayos X y el SEM-EDS, no hallando en ellos cantidades suficientemente significativas como para sobrepasar los límites que indica la norma NTC 174 para agregados finos en la fabricación de concreto reforzado tipo D. Así mismo la caracterización granulométrica indico que los relaves cumplen con el modelo estándar propuesto por la norma NTC 174 para agregados finos en la fabricación de concreto. Finalmente la caracterización química por ensayos al fuego indico la pertenencia de un tenor de 3,1 g/Tn en los relaves en bruto.

Se realizó la concentración gravimétrica de los relaves a través de un espiral Humphreys de 6 vueltas, alimentado con una pulpa al 2% porcentaje en peso, variando el flujo de pulpa, la apertura de los reflex y la granulometría, siendo la granulometría el factor individual que presenta mayor influencia en el aumento de la ley de oro en los concentrados, así como la prueba 8 con reflex cerrado, flujo al mínimo y la granulometría de 297 micrómetros la que presentó el mejor tenor con 5,667 g/Tn.

Se fabricó concreto tipo D usando las colas provenientes del espiral en distintas concentraciones y se analizaron las curvas de desarrollo de resistencia de cada una, de las cuales las composiciones de 50% y 90% son las que presentan mayor aptitud para la construcción de placa huella dado que la resistencia a la compresión que alcanzan cumple con los parámetros establecidos por la norma INV E-410 del INVIAS.

6. Recomendaciones

Se sugiere a la escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales de la universidad industrial de Santander, diseñar una práctica de laboratorio donde se de uso al espiral Humphrey presente en las instalaciones, dado que es un dispositivo completamente funcional que no demanda muchos recursos para su puesta en marcha, y así evitar que vuelva a caer en el estado de abandono que se encontraba antes iniciar este proyecto.

También a la empresa minera Reina de Oro del municipio de Vetas (Santander) que realice las gestiones necesarias para la construcción de un trazado de placahuella utilizando sus residuos mineros dada la viabilidad comprobada en este proyecto.

Referencias Bibliográficas

- American Concrete Institute. (1991). Práctica estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo. ACI 211.1; 1
- American Society For Testing And Materials International, (2017) standard test method for effect of organic impurities in fine aggregate on strength of mortar. West conshohocken: ASTM C87 / C87M-17
- Arango, M.; Olaya, Y. (2012). Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. *Gestión y ambiente*, 15(3), 125-133.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (s.f.). *Autoridad Nacional de Licencias Ambientales*. Recuperado el 31 de Julio de 2019, de <http://www.anla.gov.co/atencion-al-ciudadano/glosario>
- Bailetti, G. (s.f.). Nuevas soluciones a viejos problemas. Análisis sobre la reciente modificación del régimen legal de pasivos ambientales mineros en el Perú. *Revista Circulo de Derecho Administrativo de la facultad de derecho de la Pontificia Universidad Católica del Perú*, 8(1), 109-118
- Bouso, J. L. (1999); Las espirales de concentración y su vuelta a la actualidad. XXIV Convención de Ingenieros de Minas, Perú. p 2-3.
- Cardenas, F. J. (2019) Propuesta de uso de relaves de mina polimetálica en la fabricación de unidades de albañilería – caso ex unidad minera Mercedes 3. Tesis de pregrado: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, , 128p.
- Gutiérrez, J. (s.f.). Reaprovechamiento y remediación de pasivos ambientales mineros. *Revista ADVOCATUS de la facultad de derecho de la Universidad de Lima*, 25(1), 53-55.

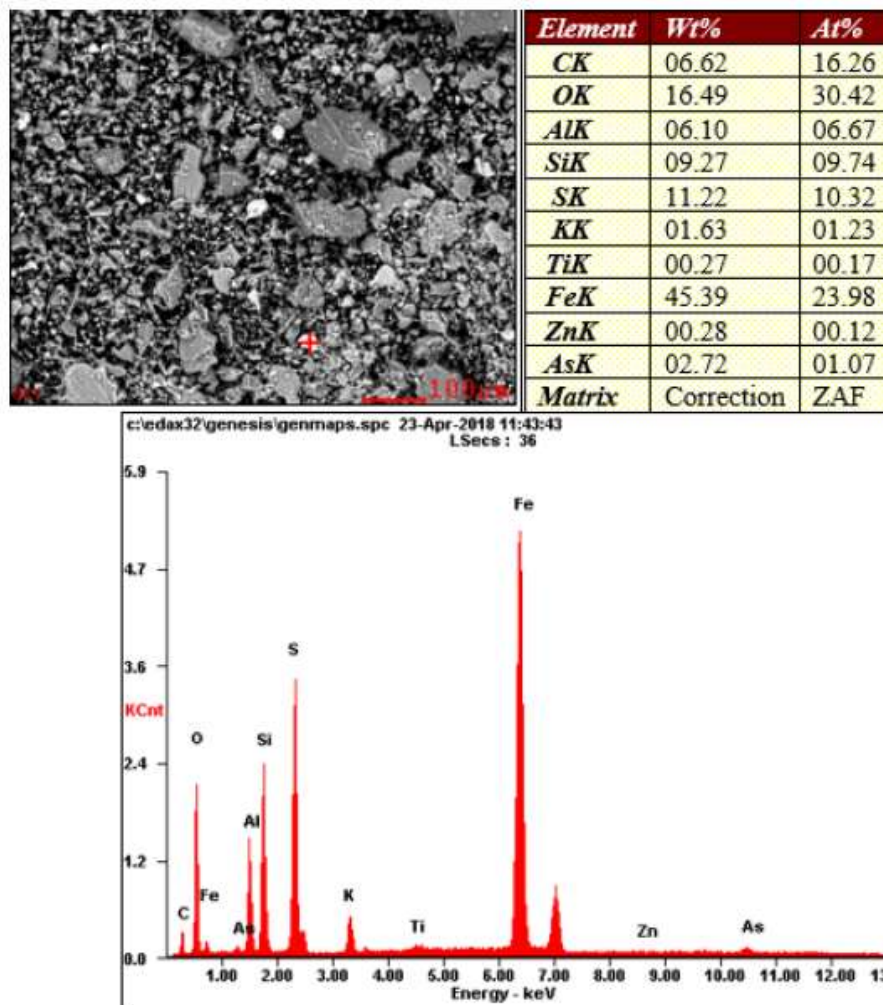
- Infante, C, (2011). Pasivos ambientales mineros: barriendo bajo la alfombra. OCMAL. Recuperado de https://www.ocmal.org/wp-content/uploads/2017/03/pasivos_22.pdf
- Instituto Nacional Del Vias. (2007) Resistencia a la compresión de cilindros de concreto. INV E-410-07
- Norma Técnica Colombiana. Concretos. (2008) Aditivos químicos para concreto. NTC 1299;. (s.f.).
- Norma Técnica Colombiana. (2000) Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra. NTC 550
- Norma Técnica Colombiana. (2010) Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. NTC 673
- Norma Técnica Colombiana. (2000) Concretos. Especificaciones de los agregados para concretos. NTC 174;
- Norma Técnica Colombiana. (1995) Ingeniería civil y arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. NTC 92;
- Norma Técnica Colombiana. (1994) Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. NTC 1377
- Romero, A.; Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 13(1), 75-82.
- Salas, A.; Hinojosa, O. (2013). Avances tecnológicos en la concentración de minerales. *Revista metalúrgica N° 34, Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Universidad Técnica de Oruro*, p. 18-29
- Salas, A.; Hinojosa, O. (2007). Experimentación metalúrgica de gravimetría centrífuga con menas de San Florencio. p. 4-5.

Apéndices

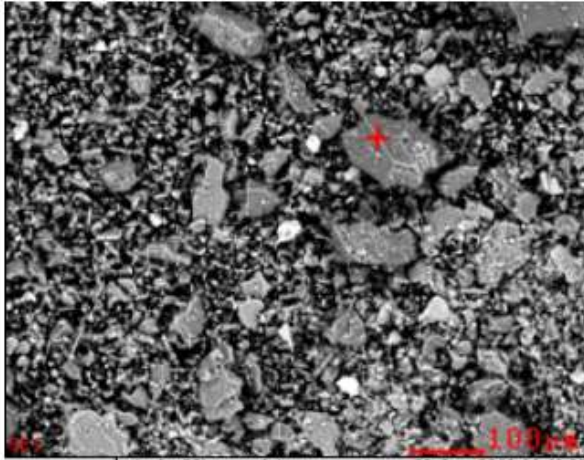
Apéndice A. Resultados de SEM-EDS

Imagen de microscopia electrónica de barrido, espectro EDS de la muestra y composición química en la ubicación señalada en cada punto de la muestra

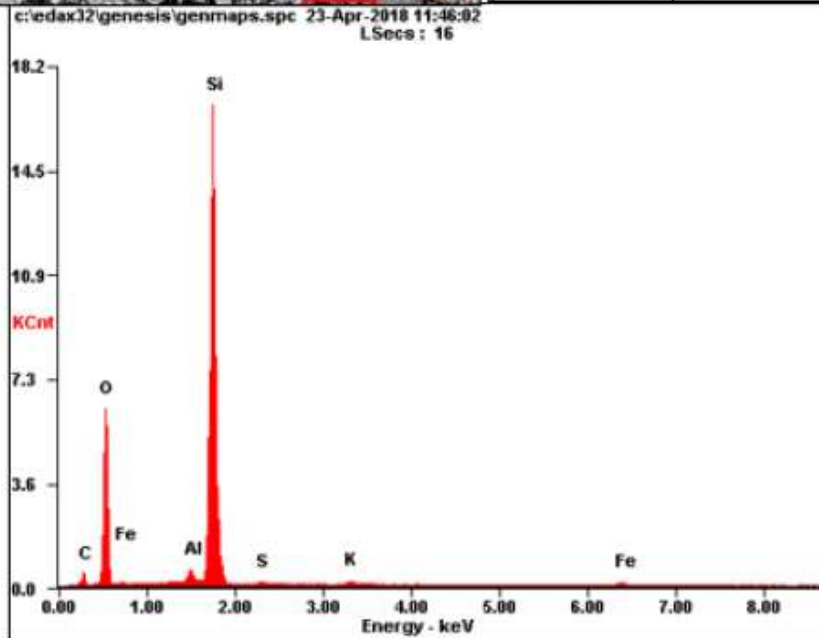
Punto 1



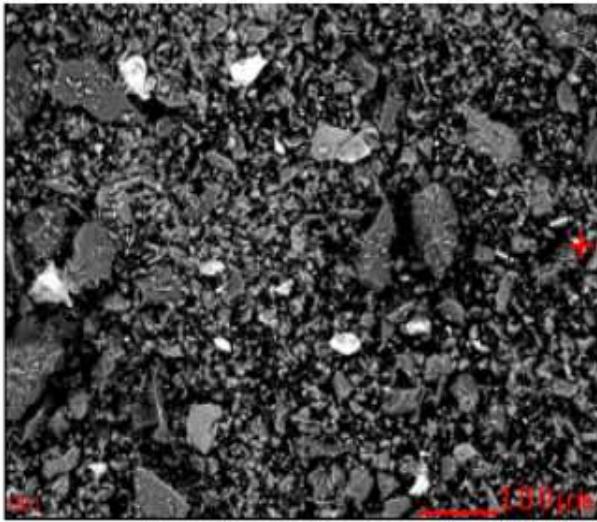
Punto 2



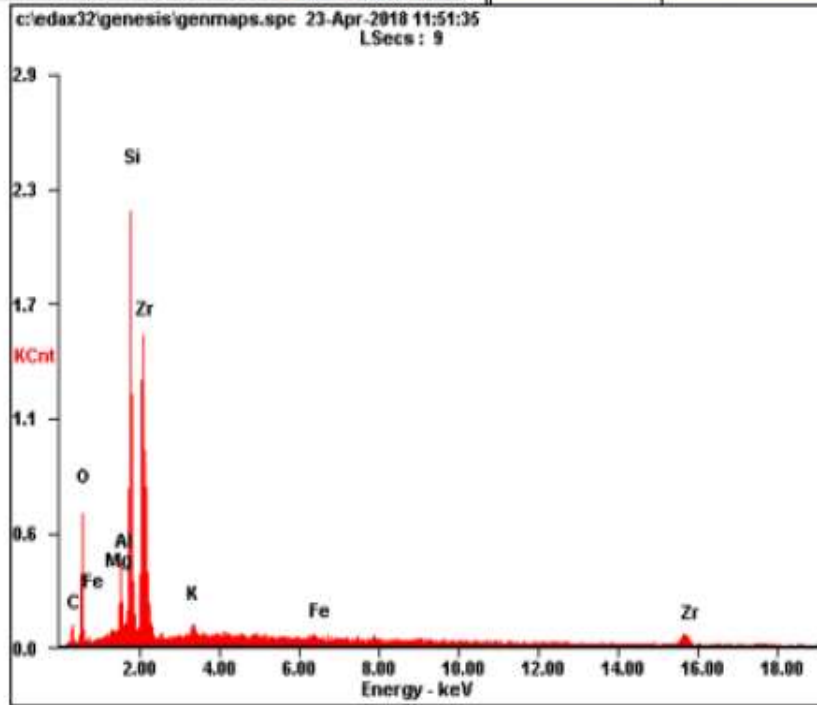
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	10.81	17.06
<i>OK</i>	45.29	53.69
<i>AlK</i>	01.26	00.88
<i>SiK</i>	40.92	27.63
<i>SK</i>	00.35	00.21
<i>KK</i>	00.44	00.21
<i>FeK</i>	00.94	00.32
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF



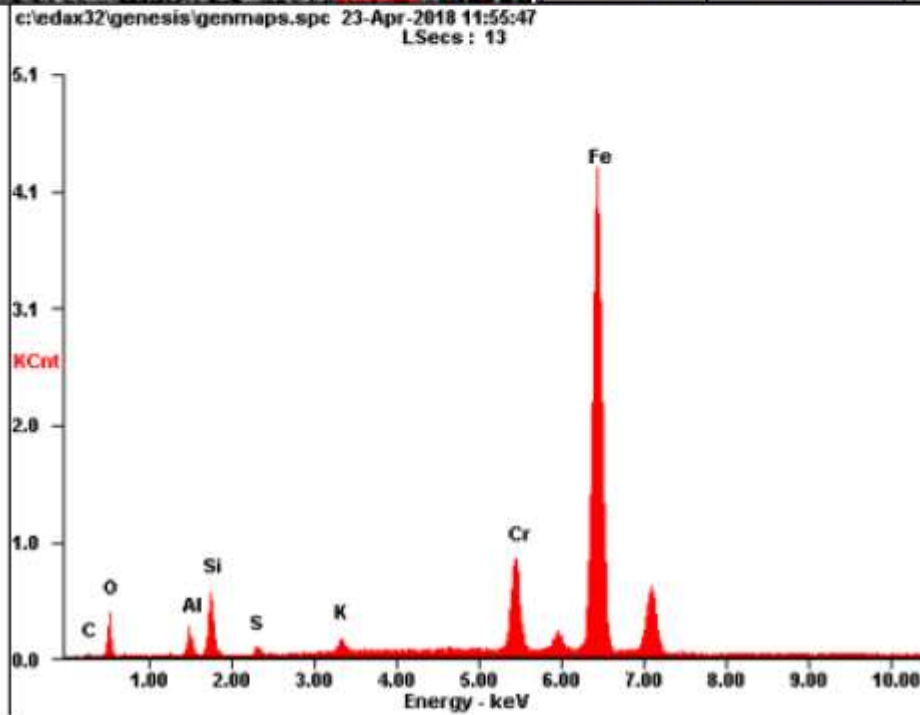
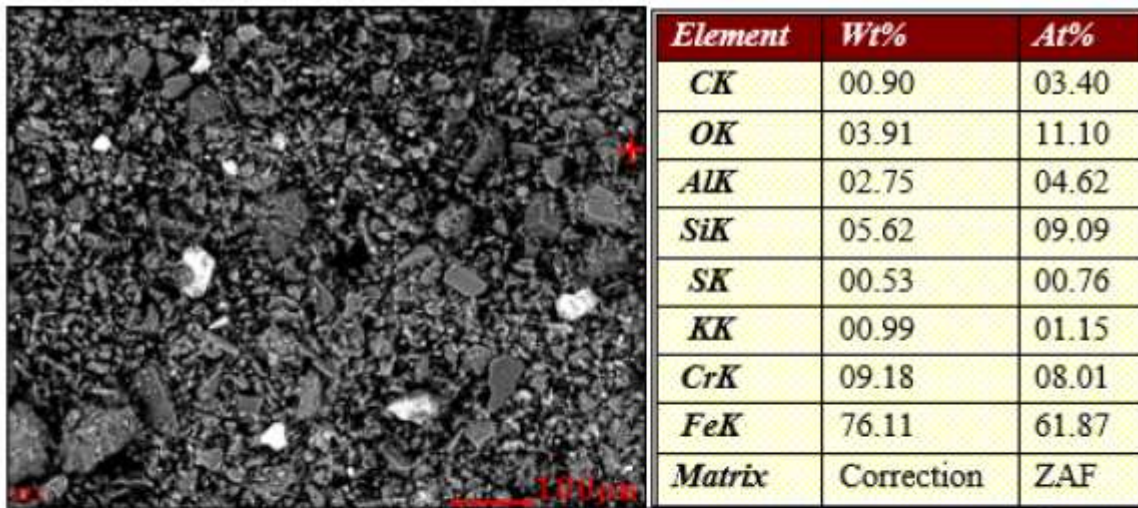
Punto 3



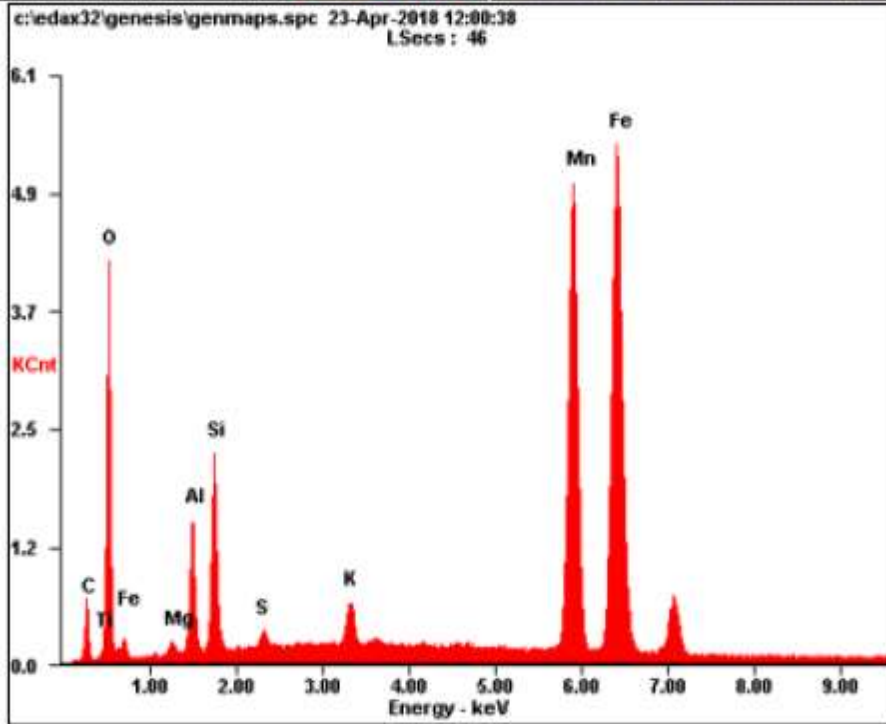
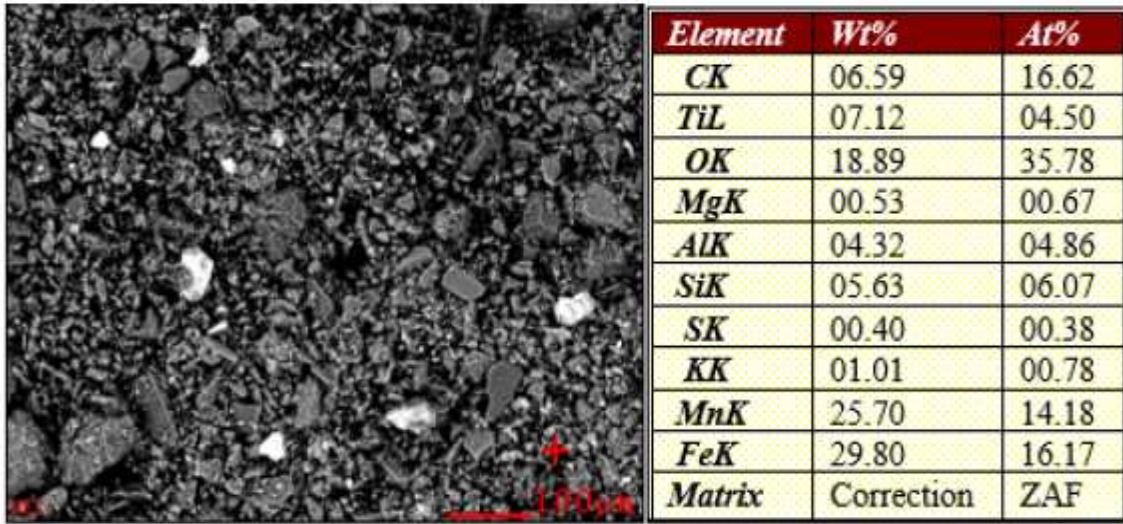
<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	09.48	20.99
<i>OK</i>	26.75	44.48
<i>MgK</i>	00.37	00.40
<i>AlK</i>	02.96	02.92
<i>SiK</i>	19.58	18.54
<i>ZrL</i>	38.41	11.20
<i>KK</i>	01.44	00.98
<i>FeK</i>	01.01	00.48
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF



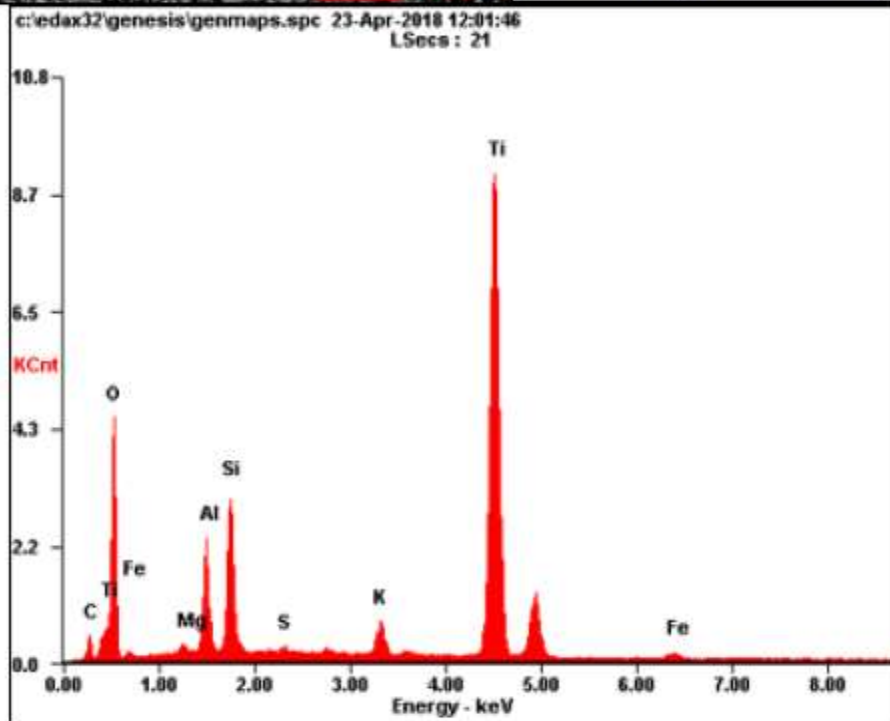
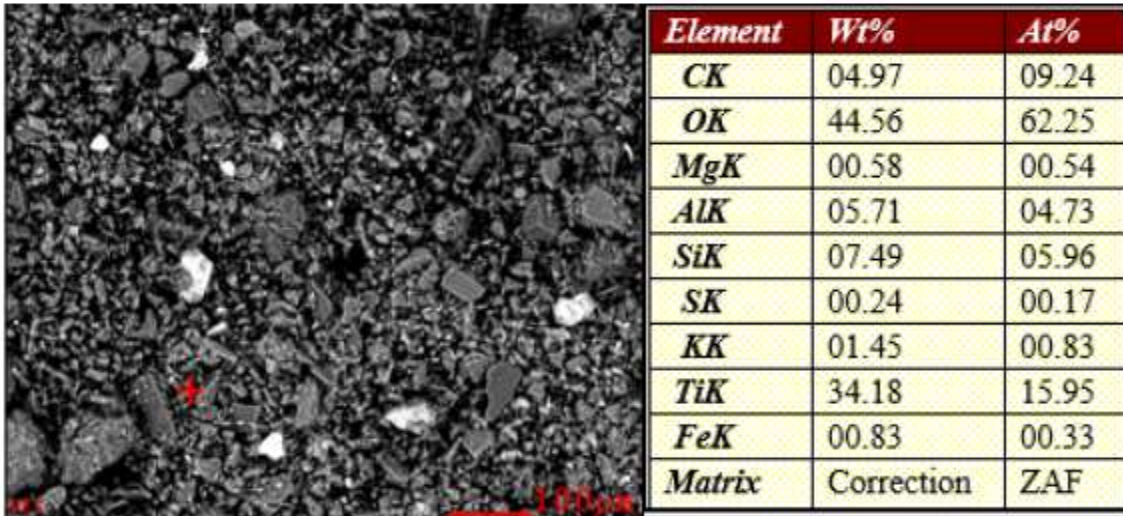
Punto 4



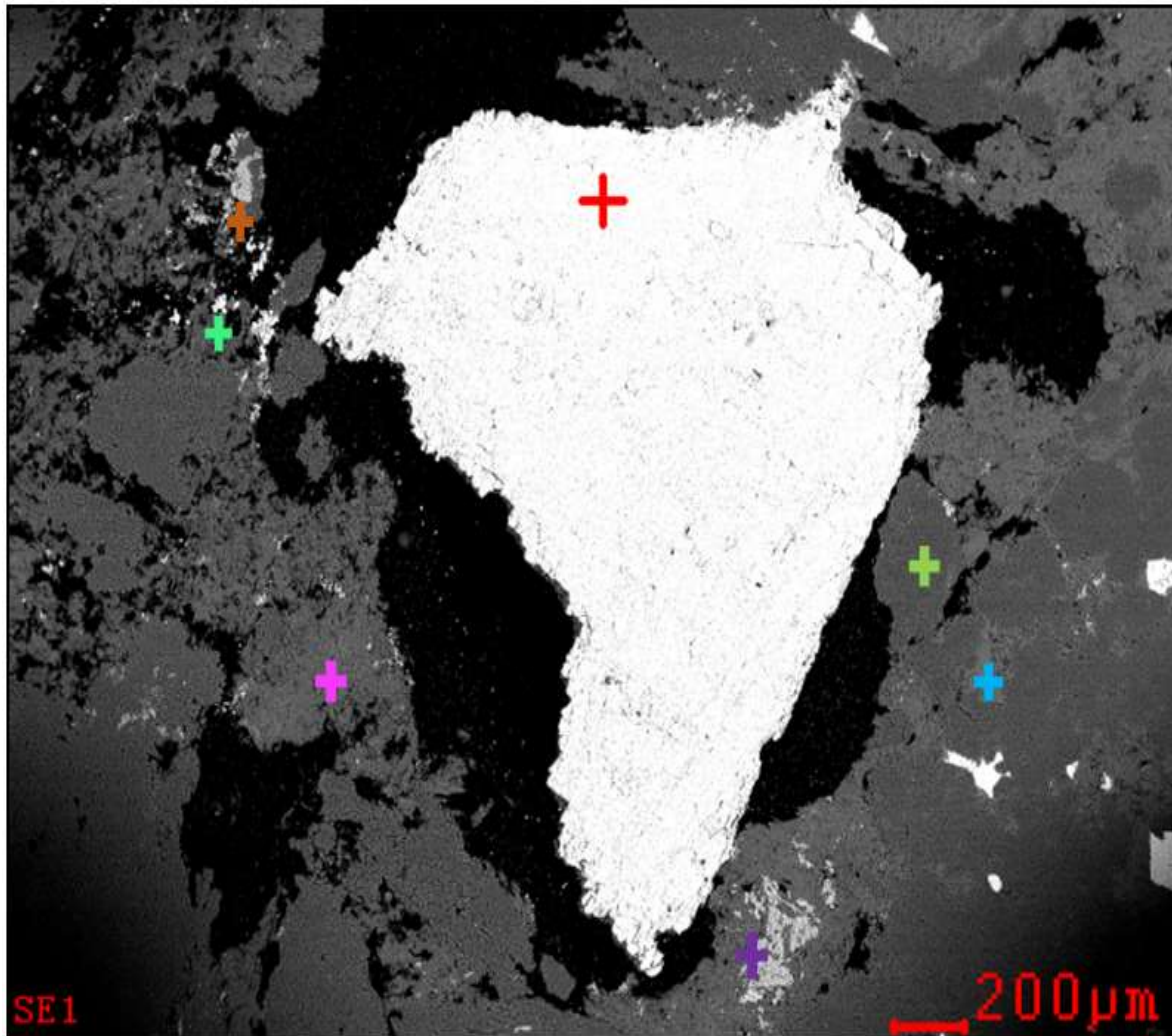
Punto 5

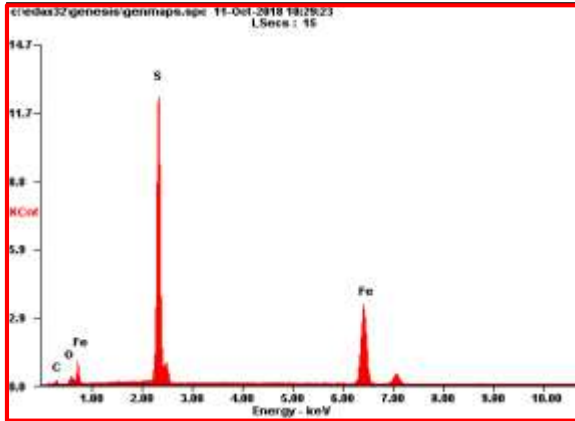


Punto 6

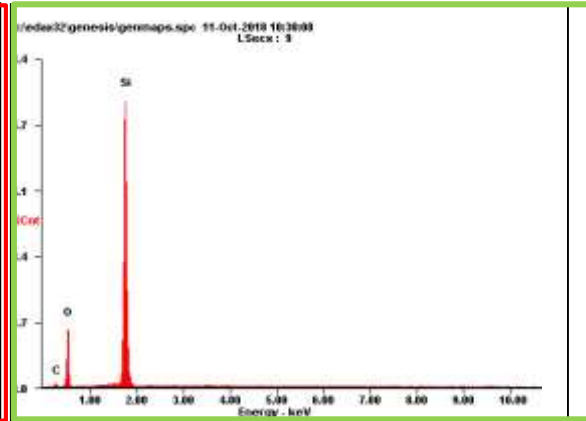


El siguiente análisis realizado a una muestra en diferentes puntos, permite observar minerales de pirita, cuarzo, silicatos, caolinita, sulfuros de cobre y mineral de Titanio.

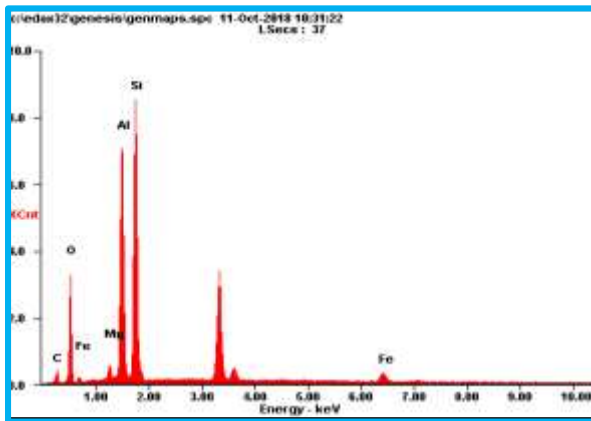




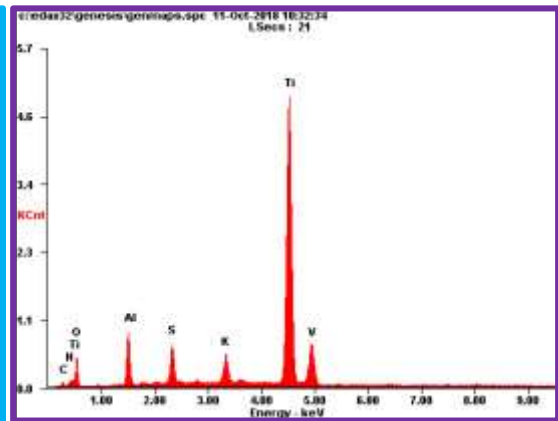
Pirita



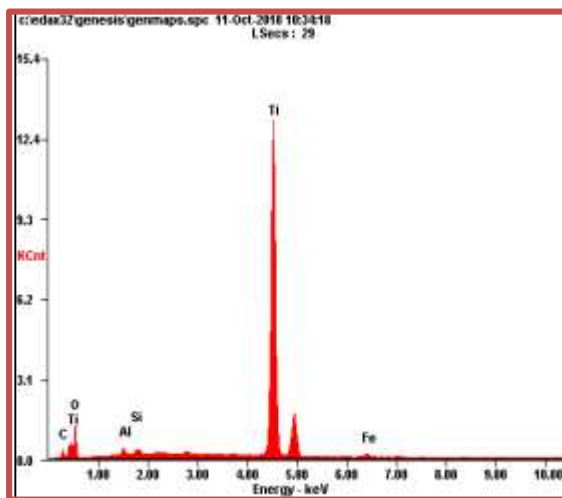
Cuarzo



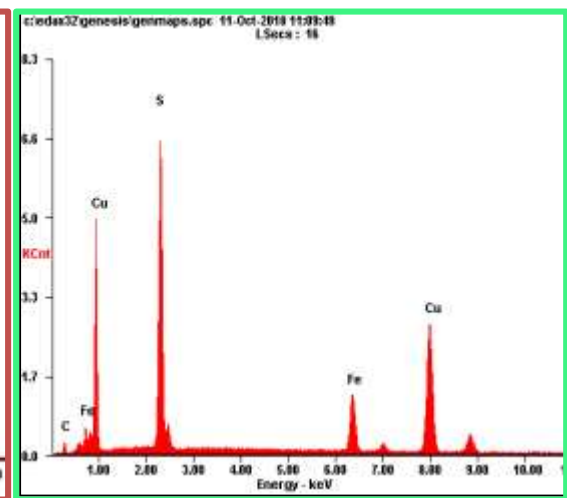
Aluminosilicatos



Caolinita



Mineral de Titanio



Sulfuros de cobre

Apéndice B. Análisis Statgraphics

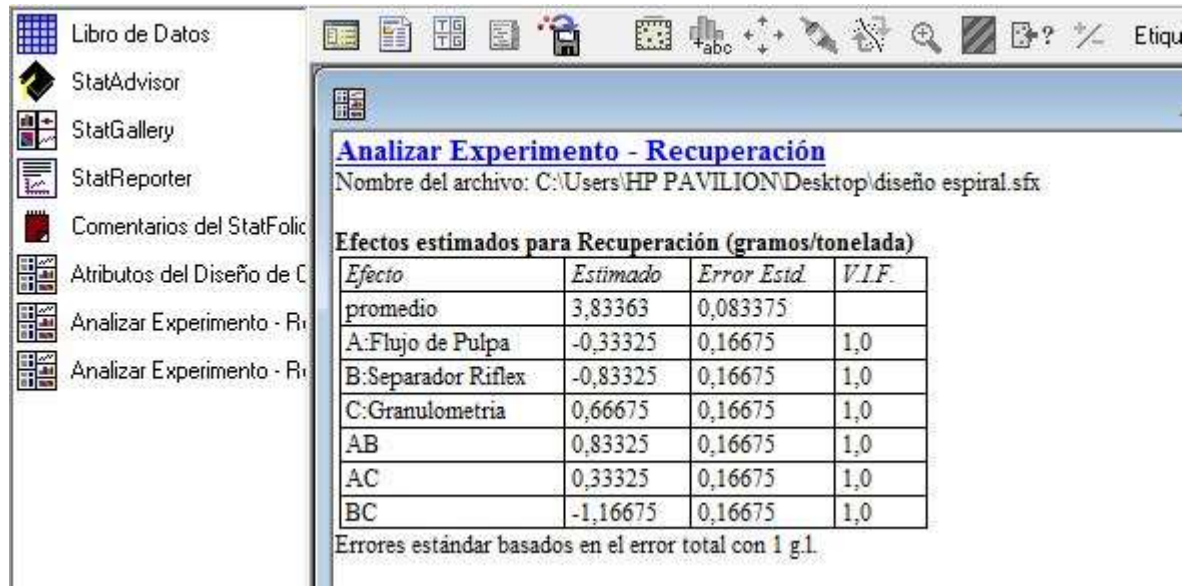


Figura A. Efectos estimados de cada variable sobre la recuperación.

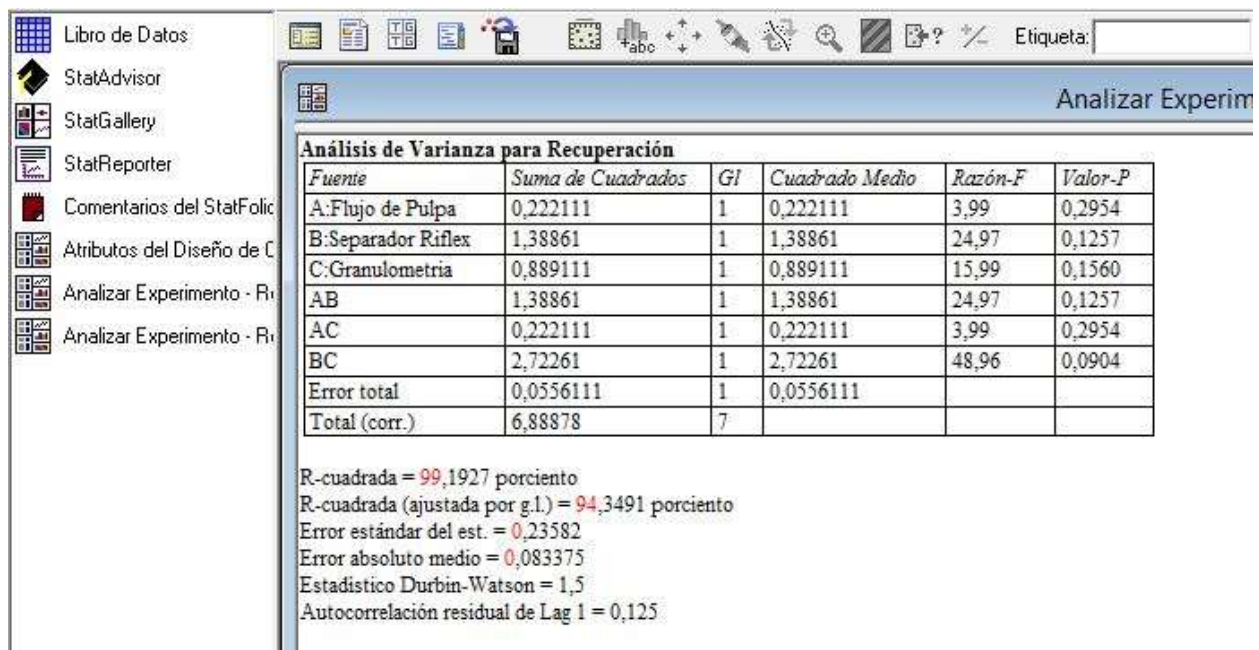


Figura B. Tabla ANOVA de varianza calculada por el software.

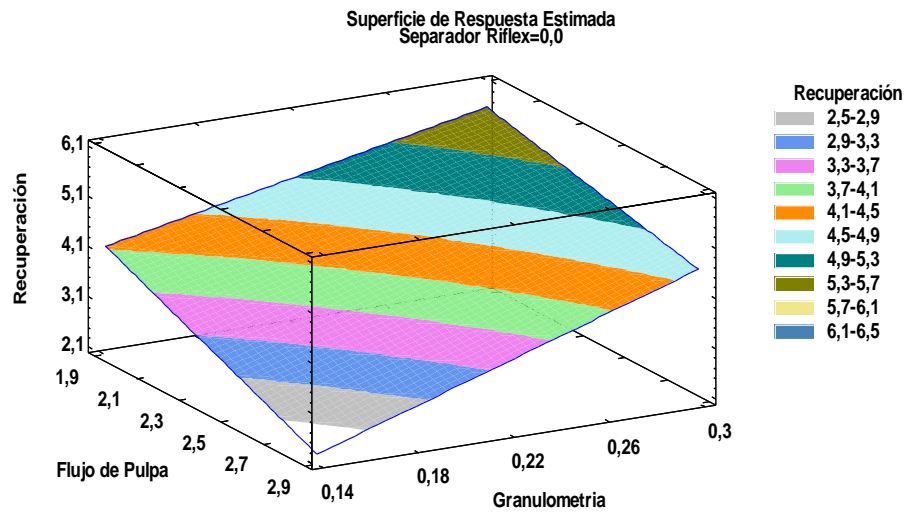


Figura C. Superficie de respuesta estimada con la variable Riflex constante.

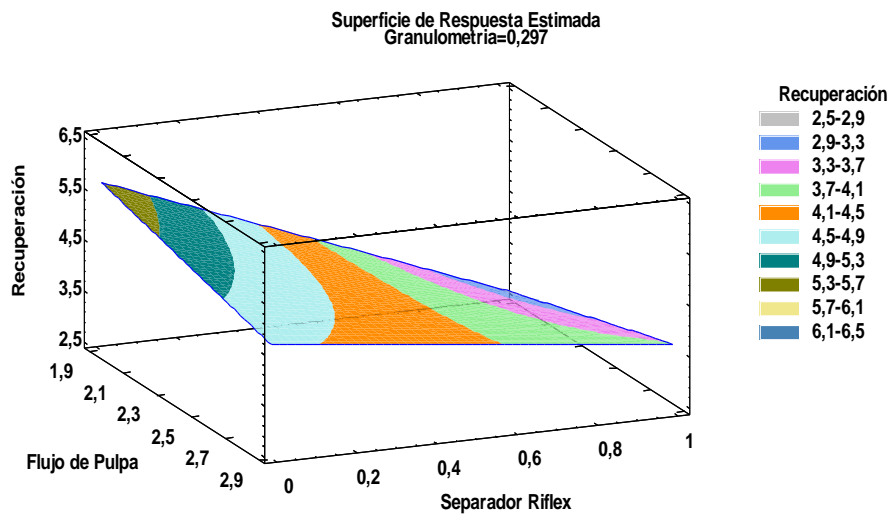


Figura D. Superficie de respuesta estimada con la variable Granulometría constante.

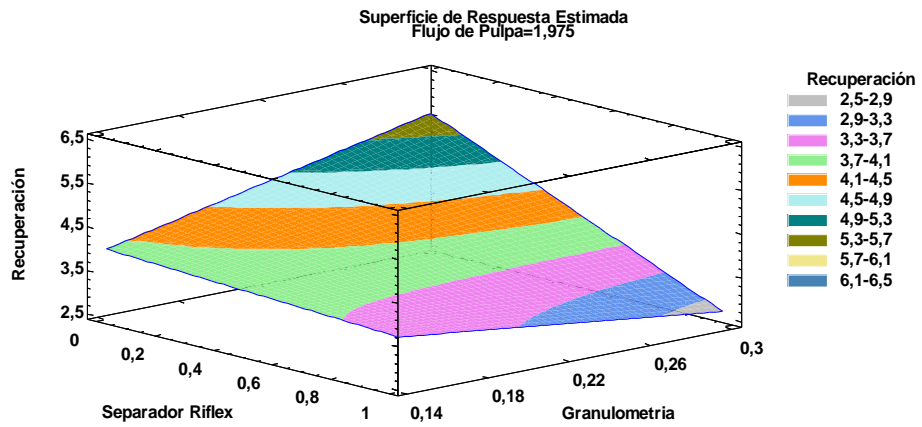


Figura E. Superficie de respuesta estimada con la variable Flujo de pulpa constante.

Apéndice C. Prueba de impurezas orgánicas



Figura F. Comparación de color mediante colorímetro ASTM

Apéndice D. Valores de resistencia del concreto

Dias de curado	Probeta 0%			Probeta 10%			Probeta 50%			Probeta 90%			Probeta 100%		
	I	II	x	I	II	x	I	II	x	I	II	x	I	II	x
7	2910,6	2812,31	2861	2623,42	2557,72	2590,57	2912,71	2779,63	2846,17	3099,28	3370,37	3234,8	2025	1940,17	1982,585
15	4656,96	4472,39	4565	2964,71	2703,03	2833,87	4528,71	4682,23	4605,47	5078,57	5155,45	5117	2594,85	2553,95	2574,4
28	4936,37	4858,48	4897	3245,57	3326,22	3285,9	4927,14	4968,64	4947,89	5381	5444	5412,5	2956,71	2815,07	2885,89

Tabla A. Valores de resistencia de los 2 bloques de probetas de concreto y sus promedios

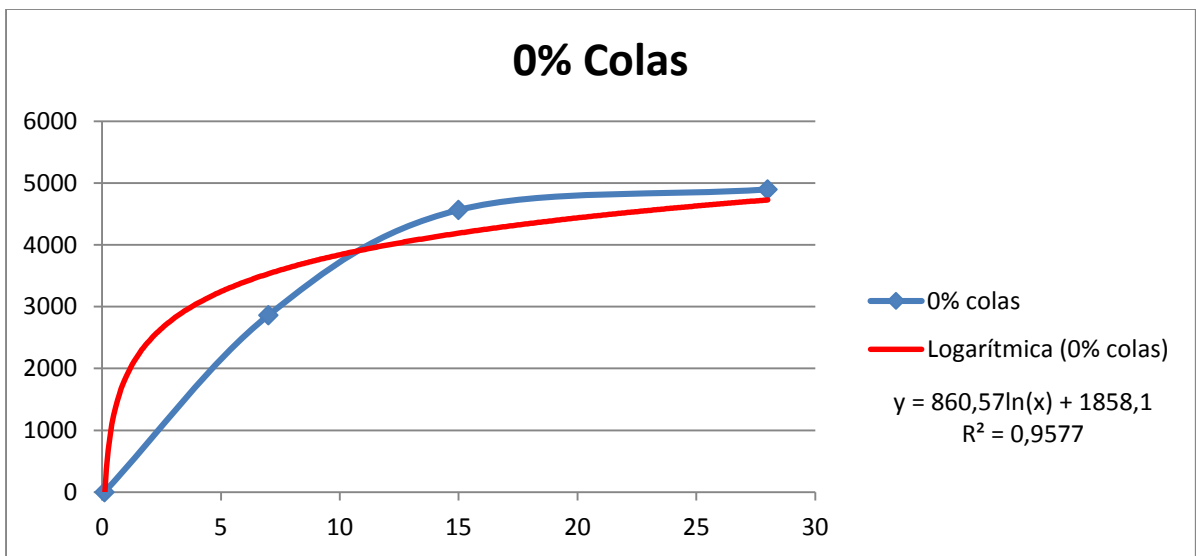


Figura F. Línea de tendencia para los valores de resistencia de las probetas al 0% colas

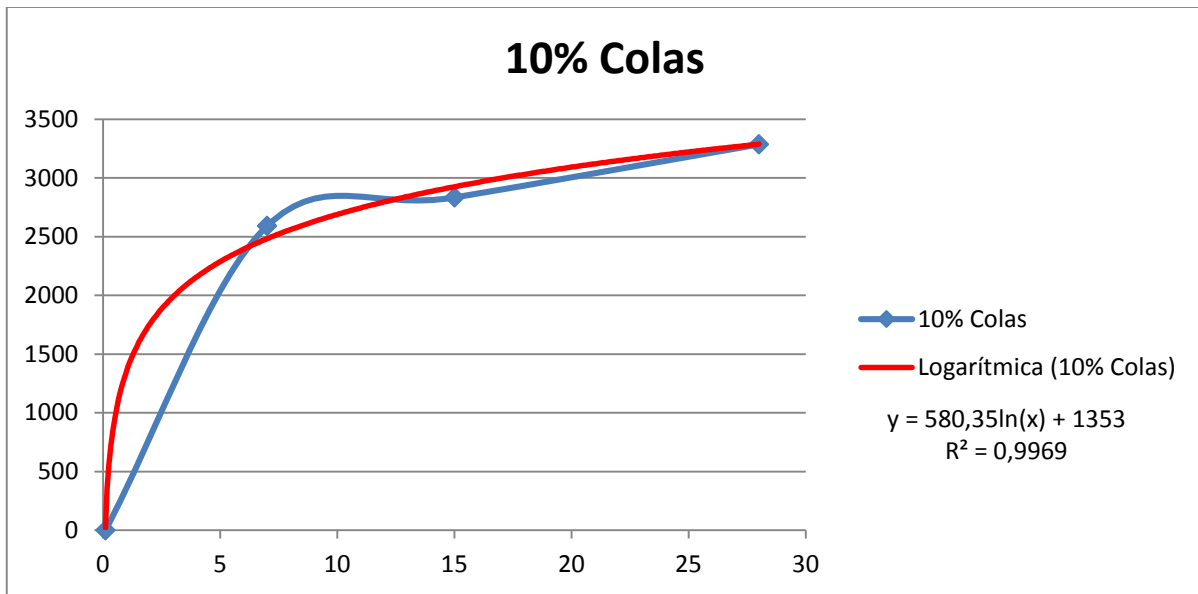


Figura G. Línea de tendencia para los valores de resistencia de las probetas al 10% colas

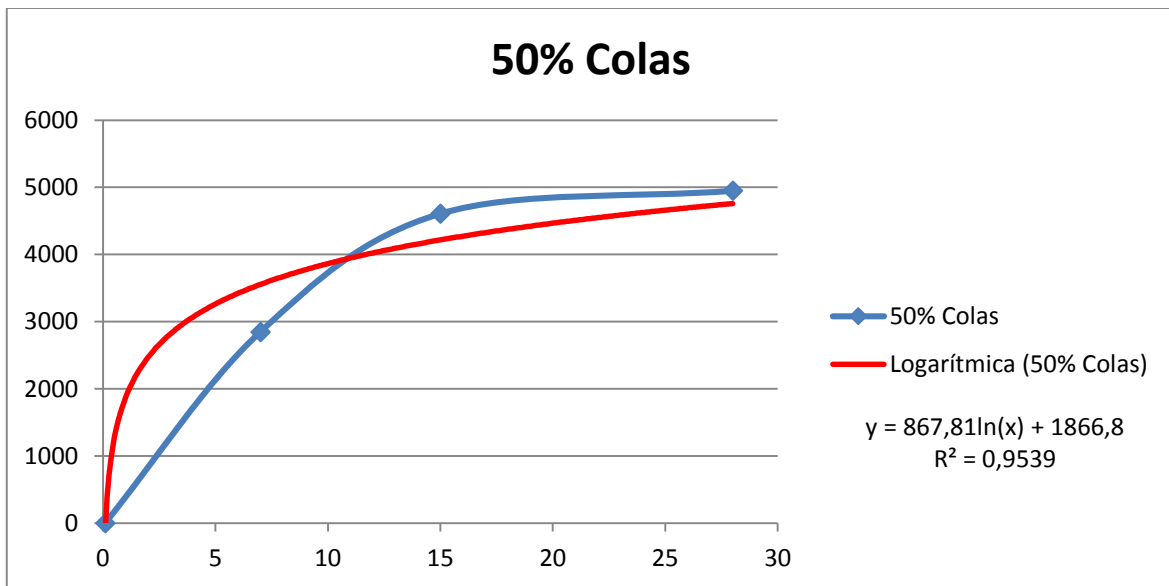


Figura H. Línea de tendencia para los valores de resistencia de las probetas al 50% colas

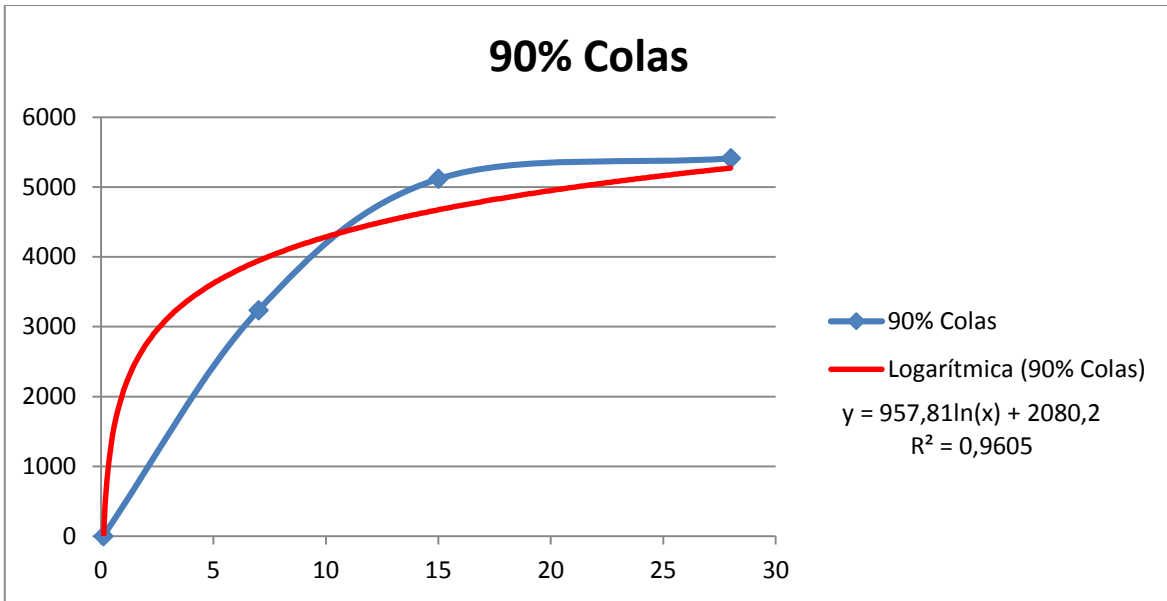


Figura I. Línea de tendencia para los valores de resistencia de las probetas al 90% colas

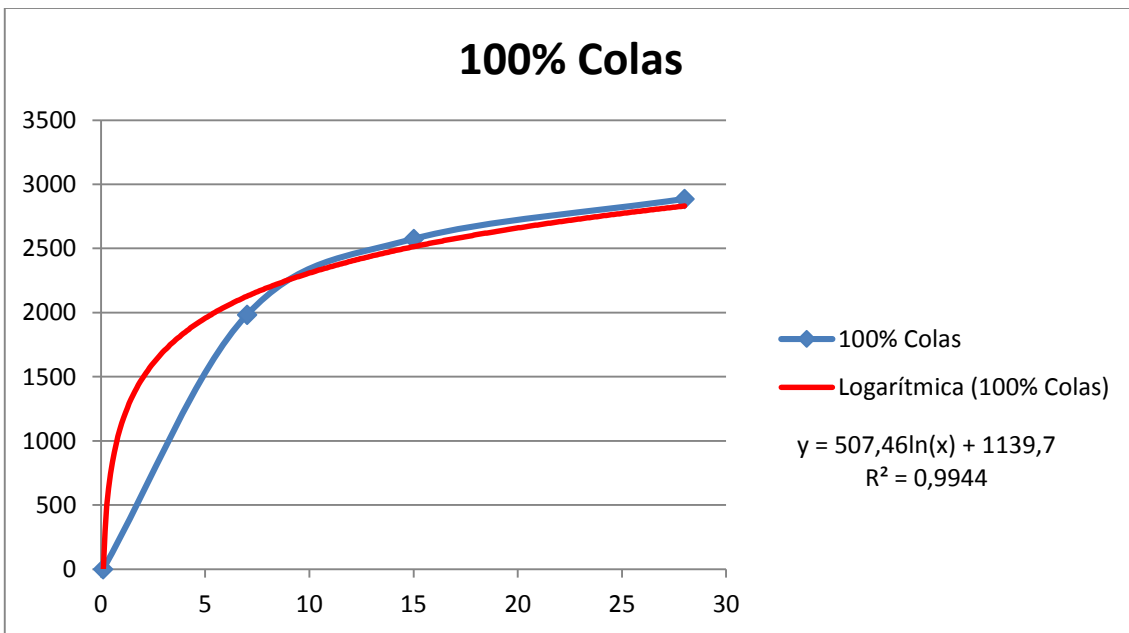


Figura J. Línea de tendencia para los valores de resistencia de las probetas al 100% colas



Figura K. Aditivo Sikaset-L y su modo de uso.