

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Producción de sílice precipitada a partir de ceniza quemada del bagazo de caña de azúcar.

Trabajo de graduación presentado por Jorge Luis Ávila Martínez para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química Industrial.

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



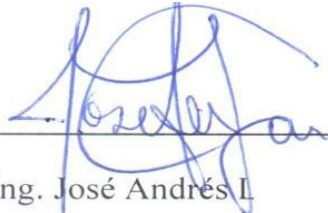
Producción de sílice precipitada a partir de ceniza quemada del bagazo de caña de azúcar.

Trabajo de graduación presentado por Jorge Luis Ávila Martínez para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química Industrial.

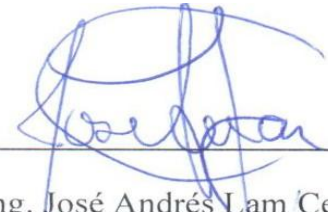
Guatemala,


2024

Vo. Bo.

(f) 
Ing. José Andrés L

Terna examinadora

(f) 
Ing. José Andrés Lam Ceballos

(f) 
Ing. Gamalie I Giovanni Zambrano Ruano

(f) 
Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda

Fecha de aprobación: Guatemala, 21 de mayo de 2024

Prefacio

La iniciativa de este proyecto fue derivado a un grupo de investigación del departamento de la Ingeniería Química propuesto por Luis Matheu, ex alumno de la Universidad del Valle de Guatemala. En este proyecto se buscan alternativas de uso para la ceniza del bagazo de caña obtenida a partir de los ingenios azucareros de Guatemala, esto se debe a que es un subproducto obtenido en el proceso de quema del bagazo de caña para generación de energía y no tiene una utilidad para otro proceso industrial en el país.

En este trabajo quiero agradecer a la Universidad del Valle de Guatemala por permitirme desarrollar mi trabajo de graduación, con todos los materiales y equipo necesario para realizar las experimentaciones de esta. Quiero agradecer a Gamaliel Zambrano, Luis Núñez y José Lam por todo el apoyo a lo largo de la carrera y la realización del proyecto de graduación. Así como también a Luis Matheu y Carlo Martinez por la mentoría y apoyo en los laboratorios de operaciones unitarias y de microbiología lugares en donde se llevó a cabo la mayor parte de la experimentación y análisis del proyecto. Para los análisis de los productos obtenidos y hacer posible la obtención de resultados del trabajo de graduación.

Para encontrar los parámetros más adecuados del proceso se utilizó el software de Minitab, que permitió realizar un modelo de superficie de respuesta para encontrar la combinación de variables más adecuada para obtener el mayor rendimiento. Además, se busca darle seguimiento a esta investigación por medio de determinar parámetros de operación adecuados y realizar pruebas en planta piloto.

Quiero agradecer especialmente a Sonia Martinez, Jorge Ávila, María José Ávila y María José Ochoa que me acompañaron en todo este proyecto, dándome ánimos e impulsarme a trabajar en el mismo, además a mi familia y amigos que siempre estuvieron para apoyarme en lo que necesitara, a los compañeros de clase con los que pasé varios años de estudios y aprendizajes a lo largo de la carrera. Las diferentes personas que me apoyaron en todos estos años. Además, al grupo de investigación que estuvo apoyando al proyecto aportando un valor agregado en la ejecución y experimentación de este. Principalmente quiero agradecer a Dios por todas las oportunidades que me ha dado a lo largo de mi vida.

Índice

Prefacio.....	iv
Índice	iv
Índice de cuadros	ix
Índice de figuras	xi
Índice de cálculos e incertidumbres.....	x
Resumen	xi
I. Introducción	1
II. Objetivos	2
A. Objetivo general:.....	2
B. Objetivos específicos:	2
III. Justificación.....	3
IV. Marco teórico.....	4
A. Silicio	4
B. Óxidos: Química del dióxido de silicio	6
C. Silanos.....	6
D. Biomasa	7
E. Cenizas de bagazo de caña.....	7
1. Cenizas volantes de biomasa	8
2. Ceniza de fondo	8
F. Métodos de obtención de silicio	8
G. Sílices precipitadas	9
H. Fertilizantes (cloruro de potasio)	10
I. Extracción de la sílice precipitada.....	11
J. Técnicas de laboratorio.....	13
1. Medida y transferencia de compuestos químicos	13
2. Montajes para llevar a cabo reacciones: Reflujo.	15
3. Aislamiento del producto.....	16
4. Extracción de producto	16
5. Secado de disolución después de la extracción.....	18
6. Filtración	18

7.	Cristalización	19
8.	Disolución del sólido a cristalizar.....	20
K.	Operaciones unitarias del proceso	20
1.	Filtración.....	20
2.	Filtro de tambor rotatorio.....	21
3.	Filtro de banda horizontal	22
4.	Cristalización	23
5.	Secado	24
6.	Tratamiento de sólidos en los secadores	24
L.	Análisis de caracterización	26
1.	Toma de muestra de ceniza	26
2.	Análisis granulométrico (tamaño de partícula).....	26
3.	Determinación de densidad aparente	28
4.	LOI.....	28
5.	Determinación de pH.....	29
6.	Solubilidad, efectos del pH y los iones complejos.	30
7.	Criterios de pureza: punto de fusión y cromatografía.....	30
8.	Cromatografía	31
9.	Determinación de la humedad de la ceniza del bagazo de caña.	31
M.	Caracterización de aspectos físicos.....	32
1.	Color	32
2.	Peso molecular	33
3.	Coloide	34
4.	Clasificación de los sistemas coloidales	35
5.	Tipos de coloides de dispersión	35
N.	Determinación de contenido de compuestos químicos	36
1.	Fluorescencia de rayos X	36
2.	Método de FTIR.....	38
3.	Método de UV/VIS	40
4.	Absorción atómica	42
Ñ.	Economía circular	43
1.	Potencialidades del sector de residuos en sus eslabonamientos productivos	44

O. Métodos estadísticos	44
1. Box Behnken Design.....	44
2. Response Surface method.....	45
3. Anova.....	48
V. Antecedentes	49
VI. Metodología.....	53
A. Diseño experimental para la caracterización de la ceniza y productos intermediarios del proceso de producción.	53
Análisis granulométrico	53
Determinación de humedad.....	53
Contenido de la ceniza	54
B. Diseño experimental a escala laboratorio de producción de sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña.....	54
C. Diseño experimental en la producción de sílice precipitada por medio de diferentes parámetros para el reflujo.....	56
D. Determinación de silicatos de potasio.....	61
1. Método del molibdosilicato para análisis de silicatos.	61
VII. Resultados.....	64
A. Caracterización de la ceniza de bagazo de caña	64
B. Producción de sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña.....	65
C. Análisis estadístico de los resultados experimentales.....	68
VIII. Discusión de resultados	76
IX. Conclusiones.....	81
X. Recomendaciones.....	82
XI. Bibliografía.....	83
XII. Anexos.....	89
A. Datos originales	89
B. Datos calculados	91
C. Cálculos de muestra	101
D. Análisis de error.....	103
A. Imágenes de experimentación	105
XIII. Glosario	130

Índice de cuadros

Cuadro 1 Propiedades elementales del silicio.	5
Cuadro 2 Energía de enlaces con el silicio	6
Cuadro 3 Propiedades de la ceniza de bagazo de caña.....	8
Cuadro 4. Propiedades químicas del cloruro de potasio.....	11
Cuadro 5. Coloides según su fase y tipo.....	35
Cuadro 6. Principales cromóforos en lectura de espectro UV-VIS.	42
Cuadro 7. Reactivos para la producción de sílice precipitada.....	54
Cuadro 8. Cristalería y equipos para la producción de sílice precitada.....	55
Cuadro 9. Reactivos para la producción de silicatos.	56
Cuadro 10. Cristalería y equipos para la producción de silicatos.....	57
Cuadro 11. Reactivos para la producción de silicatos.	58
Cuadro 12. Cristalería y equipos para la producción de silicatos.....	58
Cuadro 13. Reactivos para la producción de silicatos.	59
Cuadro 14. Cristalería y equipos para la producción de silicatos.....	60
Cuadro 15. Reactivos para el método de cuantificación de sílice.	61
Cuadro 16. Cristalería y equipo para el método de cuantificación de sílice.	62
Cuadro 17. Propiedades fisicoquímicas del material.	64
Cuadro 18. Composición química de ceniza de bagazo de caña (%).	64
Cuadro 19. Humedad contenida en la ceniza	64
Cuadro 20. Determinación de densidad aparente (de bulto) de la ceniza de bagazo de caña	65
Cuadro 21. Proporciones y producción de corridas para obtención de sílice precipitada	66
Cuadro 22. Rendimiento respecto a tiempos de reacción con reflujo.	66
Cuadro 23. Diseños de superficie de respuesta disponibles por número de factores continuos y número de datos de muestra.....	68
Cuadro 24. Caja de Behnken de variables independientes.	69
Cuadro 25. Variables de Behnken de variables dependientes.	69
Cuadro 26. Parámetros de operación de reflujo del proceso.	89
Cuadro 27. Mediciones de absorbancia de las muestras de silicato en triplicado.	90
Cuadro 29. Datos para realización de curva de calibración en mediciones del espectrofotómetro.	91
Cuadro 30. Mediciones de muestras de silicatos producidas a partir de ceniza de bagazo de caña.	92
Cuadro 31 Ecuación de regresión de la superficie de respuesta.....	94
Cuadro 32. Análisis de varianza del reflujo.....	94
Cuadro 33 Datos de tamaño de partícula obtenidos del análisis granulométrico de la ceniza de bagazo de caña.	98

Índice de cálculos e incertidumbres

Cálculo 1. Determinación de humedad de la ceniza utilizada para la producción de sílice precipitada.	101
Cálculo 2. Cálculo de número de datos determinados para realizar el box-Behnken.	101
Cálculo 3. Determinación de concentración de óxido de silicio en meta silicato de potasio obtenido para la solución madre.	101
Cálculo 4. Determinación de volumen de solución madre para la solución de ácido oxálico.	102
Cálculo 5. Determinación de concentración de solución de ácido clorhídrico para análisis en espectrofotómetro.	102
Cálculo 6. Determinación de concentración de ppm a partir de la absorbancia medida.	103
Cálculo 7. Determinación de rendimiento en la muestra.....	103
Cálculo 8. Determinación de media de absorbancias obtenidas de análisis en espectrofotómetro.	103
Cálculo 9. Determinación de desviación estándar de la absorbancia obtenida de las lecturas en espectrofotómetro.	104
Cálculo 10. Determinación de incertidumbre de silicato de potasio posterior a la filtración.	104
Cálculo 11. Determinación de incertidumbre de sílice precipitada como producto final. .	104

Índice de figuras

Figura 1 Esquema de silicio cristalino, con un átomo de silicio rodeado de otros cuatro átomos.....	5
Figura 2. Representación visual del cloruro de potasio.....	10
Figura 3. Transferencia de un sólido del papel, ayudándose de una espátula.	14
Figura 4. Uso de varilla de vidrio en el trasvase de un líquido.	15
Figura 5. Montaje de reflujo.	16
Figura 6. Montaje para una extracción.	17
Figura 7. Montaje para filtración al vacío.	19
Figura 9. Filtro de cinta horizontal.	23
Figura 10. Modelos de interacción gas-sólido. a) flujo de gas sobre un lecho estático de sólidos; b) flujo de gas a través de un lecho de sólidos preformados; c) acción de lluvia en un secador rotario; d) lecho fluidizado de sólidos; e) flujo en paralelo gas-sólido en un secador súbito de transporte mecánico.	25
Figura 11. Representación gráfica de un análisis granulométrico.	27
Figura 12. Escala de pH según acidez o alcalinidad.....	29
Figura 13. Ondas electromagnéticas visibles para el ojo humano.....	32
Figura 14. Espectro UV según longitud de onda y frecuencia.	33
Figura 15. Esquema simple de la fluorescencia de rayos X.	36
Figura 16. Esquema de un tubo de rayos X.....	37
Figura 17. Esquema del proceso de XRF.	37
Figura 18. Funcionamiento básico de un FTIR.	39
Figura 19. Proceso de instrumentos para realizar un análisis de FTIR.	40
Figura 20. Probeta de fibra óptica con muestra para equipo de UV-VIS.	41
Figura 21. Modelo economía circular: menos materias primas, menos residuos, menos emisiones.	43
Figura 22. Diseño factorial 2^2 y punto central distribuido en tres dimensiones.....	45
Figura 23. Superficie de respuesta de tres dimensiones mostrando el rendimiento esperado en función de la temperatura (x1) y presión (x2).	46
Figura 24. Gráfico de contorno de una superficie de respuesta.....	47
Figura 25. Líneas de contorno y área mostrando relación entre tres variables.	47
Figura 26. Gráfica de superficie 3D.	48
Figura 27 Análisis granulométrico de ceniza de bagazo de caña.	65
Figura 28. curva de secado de sílice obtenida después de precipitación.....	66
Figura 29. Espectroscopia FTIR para la sílice comercial.....	67
Figura 30. Espectroscopia FTIR para la sílice obtenida.....	67
Figura 31. Gráfico de contorno de rendimiento vs tiempo, relación.....	69
Figura 32. Gráfico de superficie de respuesta rendimiento vs tiempo, relación.	69
Figura 33. Gráfico de contorno de rendimiento vs temperatura, relación.....	71
<i>Figura 34. Gráfico de superficie de respuesta rendimiento vs temperatura, relación.....</i>	<i>71</i>
Figura 35. Gráfico de contorno de rendimiento vs temperatura, tiempo.....	72

Figura 36. Gráfico de superficie de respuesta rendimiento vs temperatura, tiempo.	74
Figura 37. Diagrama de Pareto del efecto estandarizado.	75
Figura 38. Curva de calibración de espectrofotómetro para relación de concentración y absorbancia.	92
Figura 39. Gráfica de probabilidad normal de los datos recolectados	94
Figura 40. Gráfico de datos residuales contra los datos ajustados.	96
Figura 41. Histograma en respuesta de rendimiento para observar frecuencia de valor residual.	97
Figura 42. Gráfica de los valores residuales en el orden que los datos se recolectaron.	97
Figura 43 Lectura de rayos X de fluorescencia para muestra de ceniza hecho Cementos Progreso	99
Figura 44. Ceniza de bagazo de caña utilizada para la experimentación de la producción de sílice precipitada	92
Figura 45. Mezcla de hidróxido de potasio y ceniza de bagazo de caña en primeras experimentaciones.	105
Figura 46. Sistema de reflujo con ceniza, hidróxido de potasio y agua.	106
Figura 47. Filtración al vacío de solución de reflujo con ceniza, hidróxido de potasio y agua.....	107
Figura 48. Técnica de filtración al vacío.	108
Figura 49. Fase sólida de la primera filtración que contiene compuestos que no son de interés (subproducto)	109
Figura 50. Fase acuosa obtenida de primera filtración al vacío, solución de silicato de potasio.....	110
Figura 51. Fase acuosa de silicato de potasio obtenido después del reflujo y filtración al vacío.	111
Figura 52. Sistema de acidificación de solución de silicato de potasio con ácido clorhídrico.	112
Figura 53. Acidificación de solución de silicato de potasio con ácido clorhídrico.	113
Figura 54. Formación de precipitado en solución de silicato de potasio acidificada.	114
Figura 55. Bureta, varilla y beaker utilizado para acidificación.....	115
Figura 56. Monitoreo de inicio con pH básico durante la acidificación de silicato con ácido clorhídrico.....	116
Figura 57. Monitoreo del final con pH ácido durante la acidificación de silicato con ácido clorhídrico.....	117
Figura 58. Solución de silicato de potasio acidificada completamente.....	118
Figura 59. Segunda filtración al vacío posterior a acificación para obtener sílice precipitada húmeda.	119
Figura 60. Sílice precipitada húmeda obtenida luego de la filtración al vacío del silicato.	120
Figura 61. Sílice precipitada húmeda obtenida luego de filtración al vacío de silicato.	121
Figura 62. Sílice precipitada húmeda obtenida posterior a filtración al vacío.	122
Figura 63. Sílice precipitada comercial para comparación del producto obtenido.	123
Figura 64. Pesado de sílice precipitada húmeda.....	124

Figura 65. Subproducto cloruro de potasio posterior de separación con sílice precipitada potencial uso como fertilizante.....	124
Figura 66. Productos y subproductos obtenidos en el proceso de producción.....	125
Figura 67. Espectrofotómetro de absorbancia para determinación de concentración de silicatos.....	126
Figura 68. Soluciones preparadas para la cuantificación de silicato en muestras.....	126
Figura 69. Soluciones preparadas para cuantificación de silicato de potasio.....	127
Figura 70. Soluciones para cuantificación de silicato de potasio por medio de colorimetría y absorbancia.....	127

Resumen

La ceniza de bagazo de caña es un subproducto obtenido a partir de la quema de bagazo de caña para energía eléctrica. Anualmente, en Guatemala se obtienen 1,020 GWh de energía por medio de esta biomasa. Por lo cual esto genera simultáneamente 7.5 millones de toneladas de ceniza de bagazo de caña, siendo está una fuente rica en dióxido de silicio, representando más del 50% del contenido de la ceniza y por el momento no se le ha encontrado ningún uso. Por lo que objetivo principal de este proyecto es realizar una extracción del dióxido de silicio para utilizarlo como materia prima en la producción de sílice precipitada. Para proponer una metodología fue necesario caracterizar la materia prima y los reactivos a utilizar observando los posibles procesos para realizar la extracción del silicio. Con la metodología propuesta se utilizó hidróxido de potasio ya que como subproducto del proceso se obtiene cloruro de potasio comúnmente conocido por su utilización como fertilizante, durante la experimentación se obtuvo 4.187 gramos de sílice precipitada con un rendimiento aproximadamente del 82.81%. Además, por medio del método estadístico de superficie de respuesta con un modelo de box benkhen, se realizó una determinación de las mejores condiciones de operación del proceso en el reflujo de reacción, para maximizar la obtención de silicatos y aprovechar de la mejor manera la ceniza de bagazo de caña. Se obtuvo que las proporciones óptimas con una relación de 1.5 de ceniza/KOH, un tiempo de reacción 165 minutos y 85°C, indicando que la variable que tiene un mayor impacto en el rendimiento es la relación de ceniza/KOH. Con estos parámetros de operación se obtuvo un 60.29% de rendimiento de sílice obtenida de la muestra. Por medio de lecturas de FTIR se comprobó la presencia de la sílice precipitada afirmando que se obtuvo el producto deseado. Las herramientas estadísticas de superficie de respuesta permitieron mostrar gráficamente el rendimiento de cada muestra analizada. En conclusión, se logró proponer una metodología de producción de sílice precipitada con los parámetros de operación adecuados obteniendo un rendimiento por arriba del 60%.

I. Introducción

En los últimos años se ha dado una tendencia en crecimiento para dar valorización de los residuos de biomasa para el desarrollo de productos con valor agregado. La ceniza de bagazo de caña es un subproducto rico en óxido de silicio, por lo que tiene un gran potencial para poder ser utilizado en diferentes sectores industriales. El contenido de óxido de silicio en una muestra de ceniza de bagazo de caña es generalmente mayor al 50% (m/m). La mayor parte de la ceniza es producida en la Costa Sur de Guatemala, ya que en este sector se encuentran diversos ingenios siendo de los más grandes del país. Uno de los productos más utilizados en la industria química es la sílice precipitada, por lo que la ceniza se somete a un proceso de reflujo, acidificación y secado para obtener este producto deseado.

El presente trabajo indica la forma en cómo se realizó la producción de sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña por medio de una propuesta de metodología a escala laboratorio. Además, se hizo una evaluación de los parámetros de operación por medio de modelos estadísticos. La extracción de la sílice precipitada principalmente se realiza por el principio de solubilidad, debido a que posterior al reflujo de ceniza con hidróxido de potasio, se realizan filtraciones al vacío que permiten separar el resto de los componentes orgánicos, (como carbono, aluminio, entre otros) del dióxido de silicio utilizando agua como solvente.

Esto puede traer impactos operativos, ambientales y económicos, ya que al tener un modelo de economía circular se puede aprovechar todos los productos de manera eficiente sin tener residuos en el proceso. Por medio de experimentación y análisis estadístico, se podrá determinar y evaluar, las condiciones y parámetros más adecuados para realizar la producción de sílice precipitada. Por ello se buscaron las mejores condiciones del reflujo inicial del proceso mediante un modelo de superficie de respuesta se reflejaron varias combinaciones de variables independientes obteniendo diferentes resultados de rendimientos. Se pudo observar que la variable de relación de ceniza/KOH, con una relación proporcional al rendimiento es la que mayor impacto tiene en la variable de respuesta.

II. Objetivos

A. Objetivo general:

Producir sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña a escala laboratorio para brindar un uso alternativo de la ceniza obtenida como subproducto.

B. Objetivos específicos:

Realizar una caracterización de cenizas procedente del bagazo de caña por medio de un análisis de propiedades fisicoquímicas para describir la composición de la materia prima utilizada.

Proponer una metodología en la producción de sílice precipitada a partir de ceniza que bagazo de caña para estandarizar el proceso.

Evaluar variables y condiciones que permitan realizar un análisis de reacción en la extracción de sílice a partir de la ceniza de bagazo de caña para obtener las mejores condiciones del proceso.

III. Justificación

En la industria azucarera existen varios subproductos que aún no son utilizados o tienen pocos usos, uno de esos subproductos es la ceniza que se produce de la combustión del bagazo de caña. En Guatemala, se queman 7.5 millones de toneladas de bagazo de caña para generar 1,020 MW como energía eléctrica (Cengicaña, 2016). El bagazo se considera como biomasa, la cual se puede catalogar como fuente renovable, con la energía producida por los ingenios, se evita que cada año lleguen a la atmósfera más de 4 millones de toneladas de CO₂. Sin embargo, el 25% de este bagazo quemado es convertido en ceniza que se convierte en un residuo del proceso azucarero.

Sin embargo, toda esta ceniza obtenida como subproducto del proceso de la quema de bagazo de caña de azúcar se queda sin utilidad, y se vuelve un desecho que puede causar un daño al medio ambiente, además el tratamiento de residuos para cumplir con la normativa puede ser altamente costosa. Por ello se busca un enfoque de economía circular con el fin de que todos los subproductos sean materia prima de otros procesos, por lo que al utilizarse como residuos puede volver a utilizarse y buscar alternativas para tener un ecosistema en la industria azucarera, donde se pueda aprovechar la ceniza teniendo un beneficio económico, ambiental y social.

Por lo tanto, esta investigación quiere aplicar el concepto de economía circular en todo el proceso de producción de la caña de azúcar, y obtener un producto terminado utilizando la ceniza como materia prima. Se buscará convertir la ceniza de bagazo de caña en sílice precipitada, la cual puede servir como reactivo químico.

IV. Marco teórico

A. Silicio

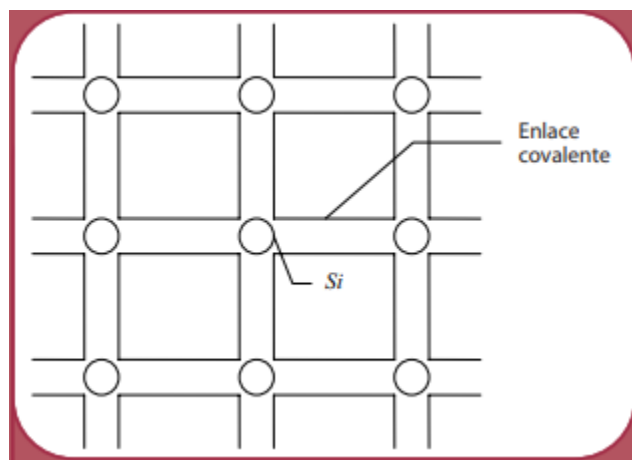
El silicio es el segundo elemento que más se encuentra en la corteza terrestre después del oxígeno, representando aproximadamente un 20% de la corteza terrestre total. Este se encuentra en el grupo 14 de la tabla periódica siendo este un metaloide, perteneciendo a la familia del carbono, sin embargo, se caracteriza por no encontrarlo en su estado puro, sino que generalmente está combinado con oxígeno en forma de óxidos de silicio y silicatos. El más común es el dióxido de silicio (SiO_2) que es representado en varias formas cuarzo, ágata, jaspe, carnelia, ópalo y pedernal. La arena en su mayoría es gran parte dióxido de silicio y rocas corrientes, salvo calizas y dolomitas que contienen silicio (Martínez, 2011).

Este elemento al tener el número atómico 14, quiere decir que un átomo de silicio aislado tiene 14 protones en su núcleo y 14 electrones orbitando alrededor de él. Diez de los catorce electrones están ligados al núcleo, mientras que los cuatro restantes son los que determinan cómo los átomos de silicio se organizan entre sí para formar el material de silicio sólido (Martínez, 2011). El silicio, como el carbón es relativamente inactivo a temperatura ambiente, pero al momento de estar expuesto a altas temperaturas, esta reacción especialmente con los halógenos para formar haluros o ciertos metales para siliciuros (EEB, 2019).

El silicio cristalino es el material base de la industria microelectrónica y fotovoltaica, posee un aspecto metalizado y es difícil de diluir. Es un material muy duro (6.5 es escala de Moss), en donde puede utilizarse para rayar o cortar vidrio. El silicio amorfo es el polvo grisáceo, más activo químicamente que el cristalino. Se une fácilmente con el flúor a temperatura ambiente y a temperaturas altas con oxígeno, cloro, bromo, azufre, nitrógeno, carbono y boro. El silicio cristalino tiene la característica de tener sus átomos ordenados en donde, cada átomo intenta unirse con cuatro átomos cercanos como se observa en la figura 1. Lo que los mantiene unidos son dos electrones que comparten uno de cada átomo (Martínez, 2011).

Figura 1

Esquema de silicio cristalino, con un átomo de silicio rodeado de otros cuatro átomos.



Fuente: (Martínez, 2011)

Debido a que la electricidad se da mediante el movimiento de electrones, el silicio es un pobre conductor de electricidad cuando todos los electrones están enlazados, por lo tanto, actúa como aislante de electricidad. Sin embargo, estos enlaces pueden ser rotos si son excitados lo suficiente por medio de un fotón proveniente del sol con bastante energía. El fotón energético ayudaría al electrón a liberarse transmitiendo su energía para que se produzca un movimiento de electrones, provocando en este caso que el silicio actuara como conductor (Martínez, 2011).

El silicio al tener diferentes estados, como que dependiendo del ambiente y de factores externos en diversas ocasiones actúa como aislante y otras como conductor, este material se denomina semiconductor. Esta propiedad es fundamental para el funcionamiento de celdas solares y para la industria microelectrónica. Por ejemplo, en la celda solar los fotones de Sol excitan a los electrones de la estructura, provocando la generación de una corriente eléctrica (Martínez, 2011).

Cuadro 1
Propiedades elementales del silicio.

Propiedades	
Número atómico	14
Peso atómico (g/mol)	28.086
Punto de fusión (°C)	1,410
Punto de ebullición (°C)	3,265
Densidad (g/cm ³)	2.33
Estado de oxidación	-4, (+2), +4
Configuración electrónica	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ²

Fuente: (Martínez, 2011).

B. Óxidos: Química del dióxido de silicio

En química, una combinación binaria, es el compuesto resultante de la unión de dos elementos simples. Con formación de un tercer, de propiedades químicas diferentes a las de los elementos químicos iniciales. Con esta lógica se puede definir a los óxidos como una combinación binaria entre el oxígeno y cualquier otro elemento. Los óxidos según sus propiedades se dividen en óxidos ácidos o básicos, según si provienen de un metal o un metaloide, en óxidos indiferentes y óxidos dichos (Unal, 2008).

La nomenclatura de los óxidos se puede determinar cuando el elemento que forma el óxido no contiene si no una valencia, su óxido se nombra con la palabra genérica óxido, seguida del metal o metaloide en genitivo, o el nombre del metal o metaloide terminando en -ico. En este caso el SiO_2 se nombra óxido de silicio u óxido silícico (Unal, 2008).

Se les llama anhídridos a los óxidos generalmente de metales que al unirse con agua producen una base. Los anhídridos son poco solubles en el agua y reaccionan fácilmente con los ácidos con formación de sales: esta reacción la efectúan con los anhídridos. El nombre de los óxidos se da con las mismas reglas establecidas. Por ejemplo, el anhídrido u óxido sódico Na_2O más H_2O produce NaOH , base, hidrato, o hidróxido (Unal, 2008).

C. Silanos

El compuesto más sencillo de silicio es el silano (SiH_4) un compuesto con una estructura muy parecida al metano (hibridación sp^3 del silicio). El silano es un gas incoloro con punto de ebullición de -112°C . EL silano se obtiene por reacción de silicio con ácido clorhídrico para formar triclorosilano. La reacción de desproporción de este genera silano y tetracloruro de carbono (Aguilera, 2019).

El átomo de silicio forma enlaces extraordinariamente fuertes con el oxígeno y especialmente con el flúor. Esta característica explica algunos aspectos de la reactividad del silicio (Aguilera, 2019).

Cuadro 2
Energía de enlaces con el silicio

Enlace	Energía (kJ/mol)
C-C	335
C-O	340
C-F	450
Si-C	320
Si-O	530
Si-F	810

Fuente: (Aguilera, 2019).

D. Biomasa

El bagazo de caña es un residuo que deriva del proceso de fabricación de azúcar, esta es producida en la etapa de molienda de la caña. Normalmente se usa como fuente de energía, ya sea energía eléctrica o calórica mediante la cogeneración. Los sistemas de cogeneración son aquellos que llevan a cabo una producción conjunta de energía eléctrica y térmica útil a partir de la misma fuente primaria, en este caso la materia prima es el bagazo (Ramírez, 2008).

Por cada tonelada de caña se produce alrededor de 264 kg de bagazo, es importante destacar que contiene aproximadamente un 50% de humedad y con un poder calorífico de 7.64MJ/kg. Producto de la incineración se obtienen cenizas y otros compuestos como residuo en donde se ha investigado para poder darles un uso adecuado y obtener una producción de ciclo cerrado, quiere decir que no se desperdicie nada del proceso (Ramírez, 2008).

E. Cenizas de bagazo de caña

El residuo de la ceniza de bagazo de caña se obtiene a partir de la caldera de los ingenios siendo este un subproducto. Este material es considerado puzolánico en diversas investigaciones debido a que su composición principal es de SiO_2 además de Al_2O_3 y Fe_2O_3 en donde en conjunto representan el 70% de la composición química de la ceniza. Debido a su impacto ambiental la ceniza es utilizada en la construcción, es una práctica que se ha venido realizando en los últimos años para aprovecharla y mejorar la composición del cemento (Vidal, 2014). La ceniza utilizada para el concreto debido a sus propiedades puzolanas, sin embargo, es poca en comparación a lo producido por los ingenios y hay gran cantidad de cenizas que no se utilizan para algún proceso en específico (Chindaprasirt, P., & Rattanasak, U., 2020).

La composición química de la ceniza del bagazo depende mucho de las condiciones de quemado, la temperatura, el tiempo de combustión y las condiciones ambientales. Debido a que normalmente el bagazo se quema en una combustión incompleta se puede observar que, en la ceniza, aún se encuentra carbono y por ello el color de la ceniza es grisácea ya que el carbono causa que la ceniza tome diferentes colores oscuros. El contenido de silica en la ceniza es dependiente de la disponibilidad de silicio en la tierra donde se haya hecho el cultivo del bagazo de caña, además de los fertilizantes y tratamientos que se les ha dado a los cultivos. La sílica de bagazo es utilizada también como relleno y extendedor de pigmentos para incrementar el volumen aparente (Chindaprasirt, & Rattanasak, 2020).

La utilización de las cenizas de biomasa tiene una aplicación muy útil para contribuir al uso sostenible de los subproductos obtenidos de la generación de energía, las cenizas que no pueden ser recicladas, estas tienen que, utilizadas para otros materiales y procesos por su composición, como por ejemplo la sílice (Chungsawang, 2018).

Cuadro 3
Propiedades de la ceniza de bagazo de caña.

Gravedad específica	2.65 a 20°C
Punto de fusión	1740°C
Punto de ebullición	2230°C

Fuente: (Chungsawang, 2018).

Existen dos tipos de ceniza provenientes de una cámara de combustión, las cenizas de fondo formas por el material total o parcialmente quemado y las cenizas volantes que son partículas finas que salen por la chimenea (CEEEO, 2020).

1. Cenizas volantes de biomasa

La ceniza volante es la fracción más fina de las cenizas, arrastradas por los gases de combustión, es recolectada y precipitada en filtros normalmente de la chimenea (CEEEO, 2020).

2. Ceniza de fondo

La ceniza de fondo es la que comprende la fracción gruesa de ceniza producida en la parrilla, en la cama inferior y en la cámara de combustión primaria de la caldera. A menudo se mezcla con impurezas minerales contenidas en el combustible de biomasa, como arena, piedras o barro, ya que hay material que queda adherido a las camas de lecho fluidizado. Las impurezas de la combustión pueden formar escoria provocado por la disminución del punto fusión y a la presencia de partículas de ceniza sinterizadas (CEEEO, 2020).

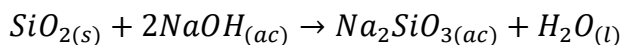
F. Métodos de obtención de silicio

El silicio, llega a la caña de azúcar como ácido silícico mediante las raíces en conjunto con otros contaminantes metálicos. Es importante que esto depende de varios factores, como la composición de la tierra en donde la caña es plantada, ya que se pueden encontrar óxidos de silicio, aluminio, calcio, hierro, magnesio entre otros (Chindaprasirt & Rattanasak, 2020).

Uno de los métodos para obtener silicio de la ceniza de bagazo de caña es realizando un tratamiento, en el cual la ceniza se suspende en una solución de ácido clorhídrico (HCl) 1.0M con agitación constante a 75°C utilizando un sistema de reflujo, con esto se puede quitar las impurezas iónicas que son efectuadas por los óxidos. Luego, se filtra al vacío y se le coloca agua destilada monitoreando el pH hasta que llegue a un valor neutro. Esta se seca en un horno durante 5 horas a 100°C para remover la humedad del agua destilada. El procedimiento continúa, con la ceniza siendo suspendida en una solución de NaOH 1.0M esta con reflujo durante 8 horas a 70°C para obtener los silicatos de sodio. Luego es filtrada nuevamente y se deja enfriar. Finalmente se titula con una solución de HCl 3.0M para precipitar el óxido de

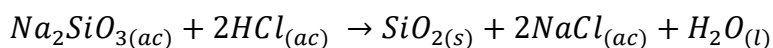
silicio y al día siguiente ya se obtiene el gel de sílica. En esta metodología se llevan a cabo dos reacciones:

Ecuación 1. Reacción de ceniza con hidróxido de sodio.



Fuente: Elaboración propia.

Ecuación 2. Reacción de silicatos de sodio con ácido clorhídrico.



Fuente: Elaboración propia.

El silicio también se puede extraer mediante un proceso electroquímico en donde el etanol actúa como solvente para que el ácido fluorhídrico reacciona con el óxido de silicio. Para luego separarlo con un aro con corriente eléctrica constante y separar el producto deseado, finalmente realizar una metalotermia para reducir el compuesto que se obtuvo anteriormente (Seroka, 2022).

Generación energética y reutilización de residuos de la industria azucarera

Durante la zafra del 2021-2022 los ingenios azucareros de Guatemala generaron 1,784 GWh de energía renovable a partir de la biomasa de la caña de azúcar representando aproximadamente el 30% de la energía consumida en el país. Para esta producción se utilizaron más de 6.4 millones de toneladas de bagazo de caña. Sin embargo, a pesar de aprovechar el bagazo de caña para la generación de energía en este proceso se obtiene la ceniza, la reutilización de este residuo es una alternativa sostenible que puede implementarse en los ciclos de nutrientes y utilizarse como fertilizantes en la agricultura. La ceniza tiene las propiedades para restaurar macronutrientes de diversos componentes.

G. Sílices precipitadas

Las sílices precipitadas, normalmente conocidas como dióxido de silicio, sus sustancias en forma de polvos inertes que no poseen componentes cristalinos, que no son tóxicos para el medio ambiente o el ser humano. Estos actúan como agentes antiapelmazantes que ayudan al control de la humedad de los productos. Las sílices precipitadas además pueden actuar como agentes espesantes, abrasivos, fluidificantes o de carga, o como aditivo tixotrópico y reforzante (Glassven, 2022). Por lo que tienen varias aplicaciones para el dióxido de silicio por sus propiedades en distintas industrias:

- Cauchos
- Neumáticos

- Pinturas y recubrimientos
- Alimentos
- Detergentes

Por la diversidad de aplicaciones que tiene es muy importante tener conocimiento de la extracción de sílica en un residuo tan abundante como es la ceniza del bagazo de caña, ya que se pueden buscar diversos usos que puedan generar utilidades en el mercado.

Es importante mencionar que la sílica precipitada es una forma amorfa del dióxido de silicio, es producida mediante la precipitación de una solución que contiene sales de silicato. Existen tres tipos principales de silicio amorfo: sílica pirogénica, sílica gel y sílica precipitada. La sílica precipitada es la más utilizada ya que no cuenta con microporos (Kumar, 2022).

La sílica precipitada se obtiene haciendo reaccionar una solución alcalina de silicato con un ácido mineral. La adición de soluciones de ácido sulfúrico y silicato de sodio a la solución de silicato alcalina se realiza simultáneamente con la agitación del agua. Las propiedades de sílica pueden verse afectados por el tiempo de precipitación, temperatura, concentración, pH y velocidad de reacción (Kumar, 2022).

H. Fertilizantes (cloruro de potasio)

Los fertilizantes potásicos son comúnmente utilizados para superar las deficiencias de las plantas. Especialmente es lugares donde los suelos no pueden abastecer las cantidades de potasio requeridas por los cultivos. Potasa es un término general usado para designar una variedad de fertilizantes utilizados en la agricultura que contienen potasio. Para ello, la fuente más utilizada es el cloruro de potasio (KCl) que también se conoce como muriato de potasio, este nombre se utilizaba antiguamente para designar las sales que contienen cloruro. El color del KCl puede variar desde rojo hasta blanco, dependiendo de la fuente de silvinita. El tono rojizo es proveniente del óxido de hierro en pequeñas cantidades, cabe mencionar que no existen diferentes agronómicas entre las formas rojas y blanca del KCl (Jaramillo, 2021).

Figura 2.

Representación visual del cloruro de potasio.



Fuente: (Jaramillo, 2021).

El cloruro de potasio cuenta con diferentes propiedades químicas importantes para entender sus aplicaciones y cómo actúan en las tierras como fertilizantes:

Cuadro 4.

Propiedades químicas del cloruro de potasio.

Fórmula química	KCl
Grado de fertilizante	0-0-60
Contenido de K ₂ O	60 a 63%
Contenido de Cl	45 a 47%
Solubilidad en agua (20°C)	344 g/L
pH solución	7

Fuente: (Jaramillo, 2021).

El KCl es el fertilizante potásico más extensamente utilizado debido a su bajo costo y a que incluye más cantidad de potasio que otras fuentes entre 50-52% de potasio (60-63% K₂O) y 45-47% de Cl. El KCl normalmente es esparcido sobre la superficie del suelo previo a las labores para la siembra. También puede ser aplicado en bandas cerca de la semilla. Ya que al disolverse el fertilizante se incrementará la concentración de sales solubles, KCl en bandas se coloca al costado de la semilla para evitar daños durante la germinación de las plantas (Jaramillo, 2021).

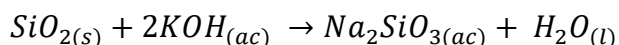
El cloruro de potasio se disuelve rápidamente en la humedad del suelo. El potasio será retenido en los sitios de intercambio con carga negativa de arcillas y materia orgánica. Mientras que el cloruro se moverá rápidamente con el agua del suelo. Este es utilizado como fuente de potasio para la nutrición en la tierra, mientras que otros les beneficia el cloruro. El KCl también puede ser utilizado como una sal sustituta en dietas para personas con restricción de sal común (NaCl). Es usado como agente descongelante y posee un valor fertilizante luego del deshielo, también se utiliza como ablandador de aguas para remplazar el calcio en el agua (Jaramillo, 2021).

I. Extracción de la sílice precipitada

La sílice cuenta con fases amorfas representadas de un color grisáceo en donde indica que hay presencia de carbono debido a una combustión incompleta. El residuo de combustión que es la ceniza de bagazo de caña representa aproximadamente el 20% del bagazo total quemado en las calderas u hornos. El contenido de sílice presente en la ceniza es influenciado por la cantidad de sílica presente en la tierra, además depende de la absorción del ácido silícico por parte de la caña de azúcar, transportándola hacia los brotes, donde se deposita como sílice amorfa (Channoy, 2017).

Al momento de colocar la ceniza con la solución de hidróxido la parte del óxido de silicio reacciona como un ácido débil mientras que el hidróxido actúa como una base fuerte, dando como resultado el silicato (Channoy, 2017).

Ecuación 3. Reacción de ceniza de óxido de silicio con hidróxido.



Fuente: Elaboración propia.

Cuando se filtra se logran separar dos fases, esto debido a que el silicato formado permite que el silicio contenido permanezca en la fase líquida mientras que en la fase sólida quedan contenidos los compuestos que no reaccionaron, como el carbono, aluminio entre otros, logrando la separación de estos por medio de una filtración al vacío. Cabe resaltar que el silicio y el hidróxido de potasio o sodio es soluble en agua, mientras que el carbono o aluminio son insolubles en agua (Channoy, 2017).

En muchas formas las soluciones de silicato de potasio son semejantes a las soluciones de silicato de sodio, sin embargo, una de las diferencias significativa es que las soluciones de silicato de potasio son más viscosas que los silicatos de sodio. En este caso los silicatos de sodio son soluciones en agua manufacturadas a partir de proporciones variadas de óxido de sodio (Na_2O) y óxido de silicio (SiO_2). Dependiendo de su composición dar un amplio rango de propiedades físicas y químicas (SDSA, 2020).

Teóricamente, los óxidos de sodio y silicio pueden ser combinados en toda proporción. Sin embargo, los productos líquidos actuales no pueden exceder en una relación molar de SiO_2 a Na_2O de 3.5 a 1 inferiores a 1.6 a 1. En su mayoría se tiene más contenido de óxido de silicio que óxido de sodio o potasio (SDSA, 2020).

En la industria de los silicatos la densidad ha sido expresada en términos de grados Baumé que pueden ser convertidos en gravedad específica, dividiendo 145 entre 145 menos grados Baumé, estas medidas se realizan con hidrómetros a 20°C . La temperatura tiene un efecto sobre la densidad de las soluciones de silicato, cuando la temperatura se incrementa la densidad decrece (SDSA, 2020).

La viscosidad es una propiedad física importante de las soluciones de silicato soluble. Esta es una función de la relación, concentración y temperatura. La comparación de viscosidades de soluciones de silicato de sodio de varias relaciones muestra que las viscosidades de soluciones más silíceas (relación más alta) aumentan más rápidamente con un incremento en concentración que aquellas de silicatos más alcalinos (SDSA, 2020).

El pH de las soluciones de silicato está íntimamente relacionado con la concentración y relación de peso. El pH decrece cuando se incrementa el contenido de sílice. El pH alto de soluciones de silicato se mantiene hasta el álcali es completamente neutralizado. La capacidad de amortiguamiento (resistir a cambios en el pH) aumenta cuando se incrementan las proporciones de sílice soluble. Sin embargo, las soluciones de silicato diluido mantendrán

un pH relativamente constante, aunque se le agregue ácido, quiere decir que se necesita bastante ácido para cambiar su pH (SDSA, 2020).

Los silicatos de sodio reaccionan con compuestos ácidos. Cuando las soluciones de concentraciones relativamente alta se acidifican, los aniones de silicato soluble se polimerizan hasta formar un gel. Cuando se acidifican sílices que se encuentran disueltas en concentraciones diluidas se pueden formar soles activados. Por lo que el grado de la polimerización depende de la concentración, temperatura, pH y otros componentes. La gelación ocurre de manera rápida cuando el pH es de 7. Cuando los pH se encuentran en los rangos de 8-10 y 2-5 los tiempos de gelación son más lentos produciendo soles inestables. La formación de gel es generalmente rápida en el rango intermedio que es de 5-8. Los soles de sílice coloidal se producen por medio de un intercambio de iones, diálisis y otros medios de sílice activada (SDSA, 2020).

En las reacciones de precipitación, las soluciones de silicato de sodio reaccionan con cationes polivalentes disueltos para formar precipitados. Dependiendo de las reacciones de las condiciones de reacción, como pH, concentración y temperatura darán como resultado silicatos de metal insoluble o sílice hidratada con óxido de metal absorbidos o hidróxidos (SDSA, 2020).

J. Técnicas de laboratorio

1. Medida y transferencia de compuestos químicos

Para que una experimentación tenga éxito es importante el uso de cantidades definidas de materiales de partida y reactivos. Por lo que la estandarización del proceso a escala laboratorio es muy importante y las partes experimentales tienen que ser seguidas al pie de la letra de una metodología. Para los sólidos la cantidad correcta que se tiene que colocar en una reacción se da por medio de peso. La precisión de la pesada requerida depende de la escala de la reacción. Si las cantidades son muy pequeñas se requiere de una balanza más precisa y mayor cantidad de decimales y obtener mayor exactitud se puede transferir la sustancia por medio de una espátula o una cuchara con un papel y así se evita que se pierda parte del compuesto pesado (Ined, 2006).

Figura 3.

Transferencia de un sólido del papel, ayudándose de una espátula.



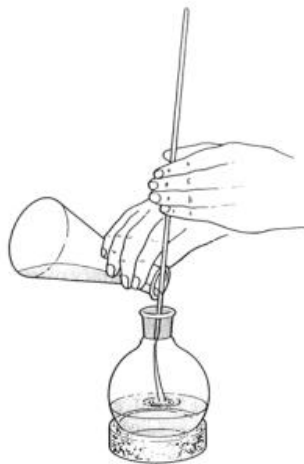
Fuente: (Ined, 2006).

Mientras que los líquidos pueden ser medidos por peso o por volumen, normalmente por facilidad se realiza por volumen, sin embargo, está la excepción que estos líquidos puedan ser los productos de reacción y que hay que pesarlo para poder determinar el rendimiento de la reacción, debido a que se desconoce su densidad exacta. Cuando hay que transferir una pequeña cantidad de un líquido de un recipiente se puede utilizar una pipeta Pasteur o un gotero (Ined, 2006).

Cuando se trasvasen líquidos desde probetas a matraces, es importante emplear embudos para evitar derramamientos, una técnica bastante utilizada es el empleo de una varilla de vidrio como se muestra en la figura 4 (Ined, 2006).

Figura 4.

Uso de varilla de vidrio en el trasvase de un líquido.



Fuente: (Ined, 2006).

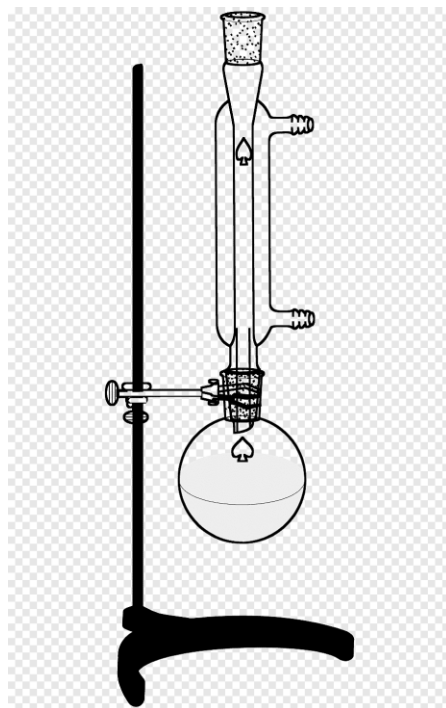
2. Montajes para llevar a cabo reacciones: Reflujo.

El montaje más utilizado en las reacciones es el reflujo. Dado que la velocidad de una reacción química se incrementa con la temperatura, muchas reacciones orgánicas se llevan a cabo a temperaturas mayores que la del ambiente, de forma que pueda completarse en un intervalo de tiempo adecuado. El modo más común de llevar a cabo estas reacciones a temperaturas elevadas es el utilizar un disolvente a ebullición en un montaje en el que el vapor del disolvente condense en un refrigerante colocado sobre el matraz de reacción, de manera que vuelva a la mezcla de reacción. La temperatura de reacción es muy próxima al punto de ebullición del disolvente escogido, por lo que se mantiene constante durante todo el transcurso de la reacción. En este caso se utiliza una estufa o una manta calefactora para calentar el matraz de reacción (Ined, 2006).

Es importante mencionar que hay que añadir algo de plato poroso antes de comenzar a calentar. El plato poroso es un sólido que actúa como germen de ebullición y ayuda a evitar los sobrecalentamientos. El plato poroso debe añadirse cuando la disolución está fría, si se añade el plato cuando el líquido está muy caliente, se corre el peligro de que esté sobrecalentado y se produzca una ebullición violenta, produciéndose la proyección de parte del líquido fuera del montaje (Ined, 2006).

Figura 5.

Montaje de reflujo.



Fuente: (Ined, 2006).

3. Aislamiento del producto

Cuando la reacción ha terminado, hay que aislar el producto de la reacción de la mezcla de reacción. El trabajo de una reacción consiste simplemente en ese aislamiento, y no en la purificación, que se realiza más adelante de ser necesario. El método de trabajo de reacción en cada práctica tiene en cuenta siempre las propiedades del producto correspondiente. En algunos casos, el producto de reacción es un sólido que cristaliza de la mezcla de reacción. En estas circunstancias el trabajo de la reacción consiste simplemente en la separación de este por filtración (Ined, 2006).

4. Extracción de producto

La extracción es una técnica que se lleva a cabo en un embudo de decantación. Mediante extracciones múltiples (habitualmente tres), combinadas con un lavado de la fase orgánica, se puede aislar el producto de reacción de una disolución. La utilidad de la técnica de extracción puede ampliarse mediante la utilización de disoluciones acuosas ácidas o básicas (Ined, 2006).

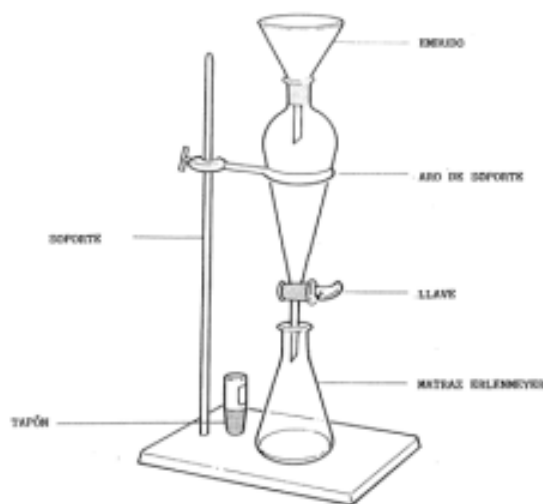
El embudo de decantación es la pieza de material más usada en la extracción de compuestos orgánicos, existen algunas reglas para su uso:

- Si la llave es de vidrio esmerilado, se debe utilizar un poco de grasa para lubricarlo y pueda entrar sin ningún problema, y evitar que se agarrote. Si es de teflón, no es necesaria la grasa.
- El embudo se debe mantener en un aro con pinza adecuado para evitar que se vuelque u ocurra un derrame.
- Siempre, se debe colocar un Erlenmeyer o un vaso de precipitados bajo el embudo de decantación antes de transferir el líquido dentro. Con ello se evita que el líquido se derrame si la llave queda abierta, al transferirlo del embudo.

Como regla general, no se debe llenar el embudo de decantación más de dos tercios de la capacidad total. Si hay que extraer un volumen grande de la muestra, entonces hay que utilizar un embudo de decantación más grande. Para poder llevar a cabo una extracción correcta es necesario que la fase orgánica y la fase acuosa se puedan mezclar eficientemente. Esto se puede lograr agitando el embudo de decantación, luego de añadir los líquidos al embudo de decantación, y antes de cerrarlo, suele ser buena idea el hacer girar suavemente para que las fases tengan una mayor homogeneidad. Esta técnica es recomendada cuando se quiere neutralizar un ácido con disolución acuosa de bicarbonato, ya que se forma dióxido de carbono y puede causar presión interna del embudo (Ined, 2006).

Figura 6.

Montaje para una extracción.



Fuente: (Ined, 2006).

Luego de mezclarlo, se procede a colocar en su soporte para que se produzca la separación de fases. Al momento que se hayan separado por completo entre fases dentro del embudo, se procede a la decantación. Para ello, se tiene que abrir la llave, de manera que el líquido más

denso salga completamente. Posteriormente se cierra la llave, para poder sacar del embudo el líquido menos denso, lo adecuado es realizarlo por la parte superior, para evitar que se mezcle con las últimas gotas del más denso (Ined, 2006).

5. Secado de disolución después de la extracción

Cuando ha llevado a cabo la extracción del compuesto, se tiene una disolución en un disolvente orgánico que contiene el compuesto deseado. Al final de la extracción, se vierte la fase orgánica en un Erlenmeyer, evitando que pase agua de la fase acuosa. Luego en este se agrega un poco de agente desecante y se agita el matraz. Se deja el matraz en reposo, agitándolo ocasionalmente. El tiempo de secado óptimo depende de cada caso en particular, pero suele estar entre 5 y 20 minutos. Este tiempo depende de la velocidad con que se hidrata el agente desecante. Finalmente se procede a eliminar el agente desecante mediante una filtración (Ined, 2006).

6. Filtración

La filtración es una técnica que consiste en eliminar sólidos en suspensión. Se lleva a cabo haciendo pasar el líquido a través de una barrera porosa, que normalmente es papel filtro, aunque también hay placas filtrantes de vidrio. Por lo que el sólido queda retenido en la barrera sólida, y el líquido pasa. En muchos casos la fuerza de gravedad es suficiente para que el líquido pase a través de la barrera filtrante. Sin embargo, es muy tardado por lo que para acelerar el proceso de esta operación se utiliza la filtración al vacío, en la cual se aplica un vacío parcial al Kitasato provocando que la presión atmosférica sobre la superficie del líquido en el filtro fuerce a que pase a través del filtro (Ined, 2006).

La elección del tipo de filtración depende de lo que se quiera conseguir, pero en general se aplica la regla siguiente:

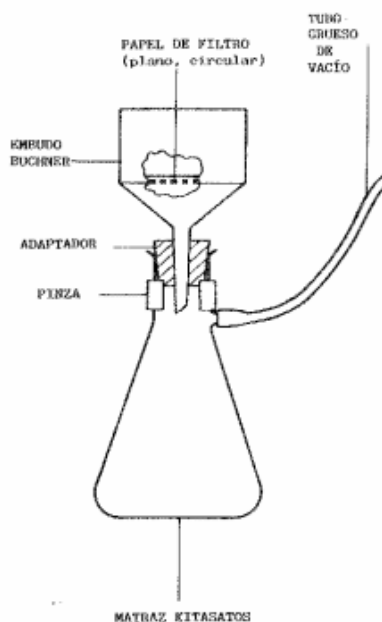
- Si lo que se desea es el filtrado (líquido) se emplea filtración por gravedad.
- Si lo que desea es el sólido, se emplea la filtración a vacío.

La filtración al vacío acelera el proceso de filtración, pero es necesario equipo adicional, estos son el Kitasato y el embudo Buchner. A través de la salida lateral, el matraz Kitasato se conecta mediante un tubo de vacío para obtener una filtración óptima (Ined, 2006).

Antes de comenzar la filtración, se humedece el papel filtro con un poco de disolvente que se va a separar en la filtración, de manera que el papel filtro quede pegado sobre los orificios de éste. Cuando todo el líquido haya pasado, se rompe el vacío sacando con cuidado el embudo Buchner de su adaptador, y se lava en cantidades pequeñas del disolvente de cristalización frío. Al momento de lavar un sólido después de haberlo filtrado, se emplearán porciones pequeñas del disolvente frío, sin vacío y se aplicará luego vacío para que se vaya el disolvente. Una ventaja de la filtración a vacío es que, si se continúa la filtración durante unos minutos después de que haya finalizado el paso del líquido, el sólido quedará seco (Ined, 2006).

Figura 7.

Montaje para filtración al vacío.



Fuente: (Ined, 2006).

7. Cristalización

La cristalización es la técnica más simple y efectiva para la purificación de sólidos. Los compuestos cristalinos son fáciles de manejar y su pureza se puede determinar fácilmente mediante la determinación de su punto de fusión. El proceso de cristalización implica cinco etapas definidas las cuales son: disolución, filtración, cristalización, recolección de cristales y secado. En general, la cristalización consiste en disolver el sólido impuro en el mínimo volumen de un disolvente caliente, filtrando a continuación, si es necesario eliminar impurezas insolubles. La disolución resultante, saturada, juntamente con las impurezas solubles en el disolvente de cristalización, se deja reposar y enfriar lentamente, con lo que formarán cristales. La disolución remanente del proceso se llama aguas madres (Ined, 2006).

El proceso de cristalización es un equilibrio entre moléculas en disolución y las que se incorporan a los cristales. Dado que la estructura cristalina está altamente ordenada, moléculas diferentes, como es el caso de las impurezas, se son incluidas en la estructura cristalina y vuelven a la disolución. Por ello, sólo las moléculas del compuesto requerido se retienen en la superficie de la red cristalina, mientras que las impurezas quedan en las aguas madres. La clave para que una cristalización tenga éxito, se debe realizar de forma lenta para que los cristales puedan formarse y pueda operar el equilibrio que excluye las moléculas de impurezas (Ined, 2006).

La formación rápida de un material sólido de una disolución recibe el nombre de precipitación, y no tiene la misma efectividad que la cristalización como técnica de purificación. Es importante mencionar que la cristalización no funciona siempre. Las sustancias que tengan una gran cantidad de impurezas a menudo no cristalizan en este caso es necesario emplear alguna técnica de purificación previa (Ined, 2006).

8. Disolución del sólido a cristalizar

Para poder cristalizar un compuesto hay que disolver la sustancia en un disolvente adecuado. La primera condición que tiene que cumplir un disolvente de cristalización ideal es que no reaccione con el compuesto a cristalizar. Además, en general debe ser suficientemente volátil para que sea fácil de eliminar de los cristales, debe tener un punto de ebullición inferior al punto de fusión del compuesto a cristalizar. La condición más importante que debe cumplir un buen disolvente de cristalización es que el compuesto sea muy soluble en el disolvente caliente y muy poco soluble en el disolvente frío (Ined, 2006).

En principio se pueden utilizar dos métodos diferentes en la cristalización de un compuesto de una mezcla de disolventes. En el primer método, se disuelve el sólido en la misma cantidad del buen disolvente en caliente, y se añade luego lentamente el mal disolvente caliente, hasta que la disolución comience a ponerse turbia, está es la señal de que comienza a estar saturada. Se añaden unas gotas del buen disolvente para que desaparezca la turbidez, se filtra la disolución y luego se deja cristalizar (Ined, 2006).

En el segundo método, no muy común, se suspende el sólido en una cantidad adecuada del mal disolvente en caliente, y entonces se añade el buen disolvente lentamente hasta que el sólido se disuelve, evitando el exceso del buen disolvente. El uso de una mezcla de disolventes favorece la formación de aceites en lugar de la cristalización, por lo que se recomienda utilizar un único disolvente. Finalmente se filtra si es necesario para separar el precipitado de las aguas madres y se procede al secado (Ined, 2006).

K. Operaciones unitarias del proceso

1. Filtración

Las separaciones son de gran importancia en la industria química. Cabe destacar, que la mayoría del equipo de proceso se destina para realizar una posible separación de una fase o de un material a partir de otro. Existen dos clases de separación, están las operaciones difusionales, en donde entra transferencia de masa entre fases y la otra son conocidas como separaciones mecánicas (Mc Cabe, 1998).

La filtración es la separación de partículas sólidas a partir de un fluido mediante el paso del fluido a través de un medio filtrante o pared separadora sobre el que se depositan los sólidos. Las filtraciones industriales van desde un sencillo colado hasta separaciones mucho

más complejas. El fluido puede ser un líquido o un gas, y la corriente valiosa procedente de un filtro puede ser el fluido, los sólidos o ambos productos (Mc Cabe, 1998).

La mayoría de los filtros industriales son filtros a presión, a vacío o separadores centrífugos. Pueden ser también continuos y discontinuos, dependiendo de que la descarga de los sólidos filtrados se realice de forma continua o intermitente. Durante buena parte del ciclo de operación de un filtro discontinuo, el flujo del fluido a través de este es continuo, interrumpiéndose periódicamente para permitir la descarga de los sólidos acumulados. En un filtro continuo la descarga de los sólidos y del fluido se realiza de forma ininterrumpida mientras el equipo se encuentra en operación (Mc Cabe, 1998).

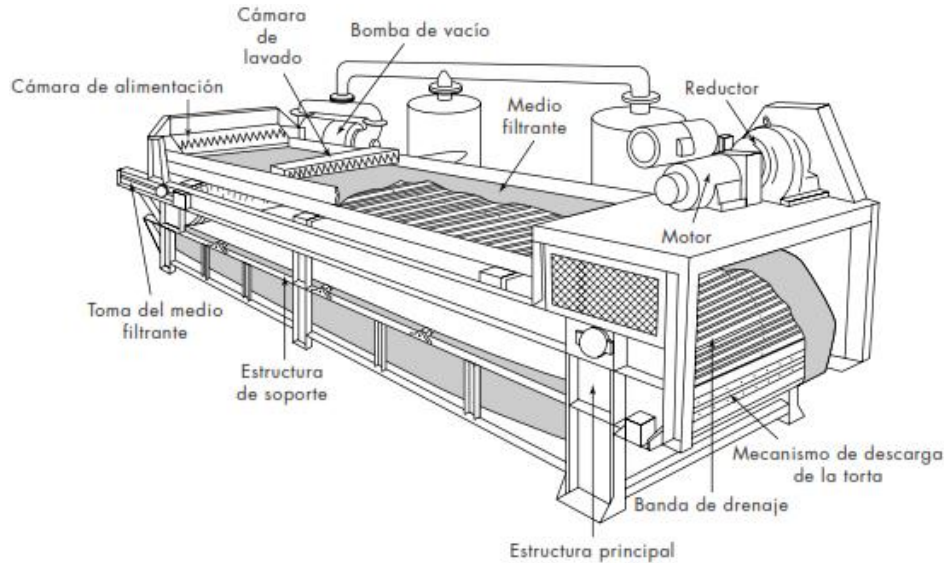
En todos los filtros continuos de vacío, el líquido es succionado a través de un medio filtrante en movimiento sobre el que se deposita una torta de sólidos. La torta se aleja de la zona filtración, se lava, se seca por aspiración y se descarga del medio filtrante para reiniciar el ciclo con la entrada de otra carga de sólidos en suspensión. En todo momento una parte del medio filtrante se encuentra en la zona de filtración, otra parte en la zona de lavado y otra en la etapa de descarga de sólidos, de forma que la salida de líquidos y de sólidos se realiza en forma ininterrumpida. La mayor parte de ellos aplican vacío desde una fuente estacionaria para accionar las partes de la unidad por medio de una válvula rotatoria (Mc Cabe, 1998).

2. Filtro de tambor rotatorio

Un tambor horizontal, con una superficie acanalada gira con una velocidad de 0.1 a 2 rpm en un depósito con la suspensión agitada. Un medio filtrante, como la lona cubre la superficie del del tambor, que está sumergido parcialmente en el líquido. Debajo de la superficie cilíndrica acanalada del tambor principal se encuentra un tambor más pequeño con una superficie sólida, hay un espacio considerado entre tambores. Conforme el tambor gira se alienta aire y vacío alternativamente en cada compartimiento para formar una sucesión de paneles (Mc Cabe, 1998).

Figura 9.

Filtro de cinta horizontal.



Fuente: (Ined, 2006).

Las aberturas centrales situadas en la banda de soporte o drenaje se deslizan sobre una cámara longitudinal de vacío en la que se descarga el filtrado. La suspensión de alimentación fluye hacia la banda desde un distribuidor situado en un extremo de la unidad, mientras que la torta filtrada y lavada se descarga por el extremo. La banda avanza medio metro cuando se interrumpe el vacío y se detiene mientras el vacío se aplica. Esto evita la dificultad de mantener un buen cierre de vacío entre la cámara de vacío y la banda móvil (Mc Cabe, 1998).

4. Cristalización

La cristalización es la formación de partículas sólidas a partir de una base homogénea. La formación de partículas sólidas puede tener lugar a partir de un vapor, como la nieve, mediante la solidificación de un líquido fundido, como ocurre en la formación de grandes monocristales, o bien como cristalización de una solución líquida. La mezcla bifásica formada por los líquidos madre y los cristales de todos los tamaños, contenida en un cristizador y que se saca como producto, tiene el nombre como magma. Un cristal sólido, bien formado por sí solo es casi puro, sin embargo, retiene líquido madre cuando se ha eliminado a partir del magma final (Mc Cabe, 1998).

La mayor parte del líquido madre es separado de los cristales por filtración o centrifugación, y el balance se elimina por lavado con solvente fresco. Las efectividades de

estos pasos de purificación dependen del tamaño y uniformidad de los cristales. Una buena producción de los cristales se mira por su pureza, pero también depende del tamaño de los cristales ya que se requiere que no se formen agregados y que no se aglomeren en el envase (Mc Cabe, 1998).

5. Secado

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es por lo común la etapa final de una serie de operaciones y, con frecuencia, el producto que se extrae de un secador está listo para ser empaquetado (Mc Cabe, 1998).

El agua u otros líquidos pueden separarse de los sólidos de manera mecánica mediante prensas o centrifugas, o bien de modo térmico por medio de evaporación. Por lo general, resulta más barato eliminar líquidos por métodos mecánicos que por métodos térmicos, y por esta razón es aconsejable reducir el contenido de líquido tanto como sea posible antes de alimentar el material a un secador térmico (Mc Cabe, 1998).

Los sólidos que se secan presentan diferentes formas como escamas, gránulos, cristales, polvos, hojas o láminas continuas y poseen propiedades muy diferentes. El líquido que ha de vaporizarse puede estar sobre la superficie del sólido, como en el secado de cristales salinos, completamente en el interior del sólido (Mc Cabe, 1998).

6. Tratamiento de sólidos en los secadores

La mayor parte de los secadores industriales operan con partículas de sólidos durante todo el ciclo de secado. Existen diferentes tipos de secadores, por el momento solo se describen los diferentes modelos de movimiento de partículas de sólidos a través de secadores (Mc Cabe, 1998).

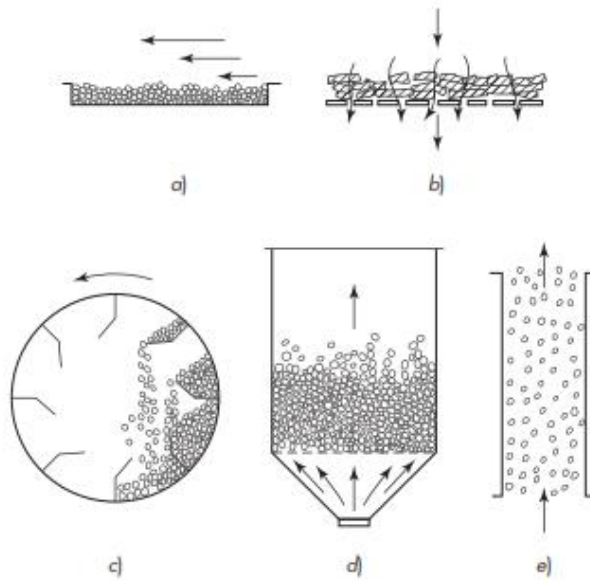
En los secadores adiabáticos los sólidos están expuestos al gas en algunas de las siguientes formas:

1. El gas circula sobre la superficie de un lecho o lámina de sólidos. Este proceso se llama secado con circulación transversal.
2. El gas circula a través de un lecho de sólidos granulares gruesos que están soportados sobre un tamiz. Este proceso se llama secado con circulación a través del sólido. Como es el caso del secado con circulación transversal, la velocidad del gas se mantiene baja para evitar el arrastre de partículas sólidas.
3. Los sólidos descienden en forma de lluvia a través de una corriente gaseosa que se mueve lentamente, con frecuencia dando lugar a un arrastre no deseado de las partículas finas en el gas.
4. El gas pasa a través de los sólidos con una velocidad suficiente para fluidizar el lecho, en este proceso es inevitable el arrastre de las partículas más finas.

- Los sólidos son totalmente arrastrados por una corriente gaseosa de alta velocidad y transportados de manera neumática desde un dispositivo de mezcla hasta un separador mecánico.

Figura 10.

Modelos de interacción gas-sólido. a) flujo de gas sobre un lecho estático de sólidos; b) flujo de gas a través de un lecho de sólidos preformados; c) acción de lluvia en un secador rotario; d) lecho fluidizado de sólidos; e) flujo en paralelo gas-sólido en un secador súbito de transporte mecánico.



Fuente: (Mc Cabe, 1998).

En los secadores no adiabático el único gas a separar es el agua o disolvente que se vaporiza, aunque en ocasiones se hace circular a través de la unidad una pequeña cantidad de gas de barrido. Estos secadores difieren principalmente en la forma en la que los sólidos se exponen a la superficie caliente u otra fuente de calor (Mc Cabe, 1998).

- Los sólidos se esparcen sobre una superficie horizontal estacionaria o que se desplaza lentamente y se “cocinan” hasta que se secan. La superficie se calienta de distintas formas, de manera alterna el calor puede aplicarse por mediante un calentador radiante situado encima del sólido.
- Los sólidos se mueven sobre una superficie caliente, por lo general cilíndrica, por medio de un agitador o transportador de tornillo.
- Los sólidos se deslizan por gravedad sobre una superficie inclinada caliente o bien son transportados en sentido ascendente por la superficie durante un tiempo y deslizándose hasta la nueva localización.

L. Análisis de caracterización

1. Toma de muestra de ceniza

Con una planificación y materiales adecuados se puede disponer de mucha más información específica del residuo en cuanto a propiedades y características químicas, que ayudan a tener conocimiento de posibles aplicaciones que puede tener en este caso la ceniza de bagazo de caña para su utilidad en diferentes industrias. La ceniza fue obtenida de diversos ingenios de Guatemala debido a que es un subproducto obtenido a partir de la quema del bagazo de caña para la generación de energía (Mc Cabe, 1998). La mayor parte de la ceniza es producida en la Costa Sur de Guatemala ya que en este sector se encuentran diversos ingenios siendo de los más grandes del país.

2. Análisis granulométrico (tamaño de partícula)

La granulometría es la propiedad física más cambiante para este tipo de material debido a la variación en el tamaño de partícula (Omil, 2007). El análisis granulométrico se define como la determinación de la distribución de partícula en un polvo de un producto o materia prima. El objetivo de la granulometría es el tamizado de una cantidad de producto a través de diferentes tamices y permite determinar la gravimetría del sólido analizado.

Su finalidad es obtener la distribución por tamaño de partículas presentes de una muestra de cenizas. Por ello es posible hacer una clasificación mediante sistemas AASHTO o USCS. Para determinar la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, en orden decreciente. Cada tamiz representa una proporción que representa en peso, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices (Corral, 2012).

El modo más común para representar gráficamente la granulometría de un sólido es a través de un diagrama semilogarítmico, en donde se presentan los tamaños de partícula en el eje X (en una escala logarítmica de base 10) y en el eje Y una escala en porcentaje en cada tamiz por donde se retuvo el sólido (Corral, 2012).

3. Determinación de densidad aparente

La densidad se define como la masa de sólidos por unidad de volumen que viene dada:

Ecuación 4. Densidad real.

$$\rho = \frac{M_s}{V_s}$$

M: masa de sólidos, V: Volumen de sólidos.

Fuente: Elaboración propia.

Para terminar la densidad real normalmente se utiliza un picnómetro ya que esta muestra la relación masa y volumen de un material (Paz, 2007).

Otra característica que se debe mantener constante en la operación es la densidad. Para medirla se recoge una muestra de ceniza y se satura con agua en el laboratorio, una vez esté saturada y después de haberla dejado drenar durante tres días se enrasa al volumen del cilindro, luego se pone a calentar a 105°C en una estufa hasta peso constante, utilizando este valor para calcular la densidad aparente (Omil, 2007).

Ecuación 5. Densidad aparente.

$$Da = \frac{Pcs}{Vcf}$$

Fuente: Elaboración propia.

En donde Pcs es el peso de la muestra de ceniza seca y Vcf es el volumen de la ceniza en su estado natural (Omil, 2007).

4. LOI

Loss on ignition es un método simple para estimar el contenido de materia orgánica y minerales de carbonato en sedimentos, utilizando una relación lineal entre los valores LOI y el contenido orgánico e inorgánico de carbón. El método se basa en un análisis térmico diferencial, que consiste en calentar la muestra a altas temperaturas designadas por medio de una ignición, esto permite que las sustancias volátiles de la muestra se pierden y escapan al ambiente, mientras que la masa que queda es medida para determinar los compuestos no volátiles en este caso la materia orgánica dentro de la muestra. Normalmente el LOI es reportado como un análisis de un mineral elemental o como óxidos, se calcula por medio de la comparación de pesos antes y después del proceso de ignición (Precisa, 2019).

Por ejemplo, se puede utilizar una muestra seca que es calentada a 105°C (LOI₁₀₅) y esto se mide con la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Determinación del Loss on ignition.

$$LOI_{105} = \frac{(WS - DW_{105})}{WS}$$

Fuente: Elaboración propia.

En donde el WS es el peso de la muestra secada y el DW_{105} es el peso de la muestra seca calentada a 105°C . Si se quiere realizar con otra temperatura se realiza la diferencia entre masas dependiendo a la temperatura que se está realizando (Santisteban, 2004). En el caso de la ceniza, se puede observar el fenómeno como parámetro donde si el bagazo fue quemado de manera incompleta tendrá un valor alto de LOI mientras que si se tiene una mejor combustión el valor de LOI será más pequeño, indica que tiene menor cantidad de materia orgánica.

5. Determinación de pH

1. El pH es una medida que indica la acidez o alcalinidad del agua. Se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua. La escala del pH es logarítmica con valores de 0 a 14. Un incremento de una unidad en la escala logarítmica equivale a una disminución diez veces mayor en concentraciones de iones de hidrógeno. Una disminución de pH representa que el agua se haga más ácida mientras que un aumento en el valor de pH se hace más básica (JRCCA, 2019).

Figura 12.

Escala de pH según acidez o alcalinidad.



Fuente: (Etecé, 2020).

La forma de distinguir entre un compuesto ácido y uno básico es mediante el pH, existen diferentes métodos para medir el pH de una sustancia.

Usando indicadores ácido-base. Los indicadores son compuestos que cambian de color al cambiar el pH de la disolución en que se encuentren. Uno de los indicadores más utilizados es la fenolftaleína, este es un líquido que se torna color rosa al momento que una base es agregada, mientras que si se agrega un ácido se torna incoloro. El papel tornasol

también es otro indicador que se rige por los colores de la escala de pH, si se sumerge un fragmento en una disolución ácido se torna rojo-anaranjado mientras que si es básico se torna azul-morado (Etecé, 2020).

Otra forma de medir el pH es por medio de un potenciómetro que este es un equipo electrónico que nos da directamente el valor de pH de una solución. Este es el método más exacto para tener el dato del pH de la solución (Etecé, 2020).

Las soluciones Buffers son disoluciones que tienen la propiedad de mantener constante el pH de una disolución, aun cuando se le añaden ciertas cantidades de ácido o base. Estas soluciones son de vital importancia en la regulación del pH de muchos procesos biológicos, debido a que para que ocurran muchos de ellos es necesario que el pH del medio en que ocurren se mantenga constante (Etecé, 2021).

6. Solubilidad, efectos del pH y los iones complejos.

La solubilidad de sulfuros, fosfatos, carbonatos o hidróxidos aumenta mucho si se acidifica la disolución. Sin embargo, esto no ocurre con los cloruros o sulfatos. Los compuestos poco solubles que en disolución producen un anión que es la base conjugada a un ácido débil, sufren reacción con los abundantes iones hidronio presentes en un medio ácido. Esto provoca la desaparición de los aniones causando un desplazamiento en el equilibrio (ABG, 2019).

Un caso interesante es la solubilización de los hidróxidos en medio básico por la formación de iones complejos en los que interviene el ion hidroxilo. Cuando se añade hidróxido de sodio a una disolución que contiene iones aluminio se forma el hidróxido de aluminio que es insoluble. Sin embargo, si se sigue añadiendo hidróxido de sodio, el precipitado se disuelve por completo. Se ha formado una disolución en las que están presentes iones complejos de aluminio (ABG, 2019).

7. Criterios de pureza: punto de fusión y cromatografía.

El punto de fusión de una sustancia puede dar una idea de su grado de pureza y también puede ser útil en su identificación. Se suele considerar que un Intervalo corto de punto de fusión ($<2^{\circ}\text{C}$) entre la primera aparición de gotas del líquido en la muestra que funde y última traza de sólido constituye una evidencia de que una sustancia está pura. El punto de fusión de una sustancia se puede utilizar para suministrar información acerca de su posible estructura (Ined, 2006).

El método más simple para la determinación de puntos de fusión consiste en introducir una cantidad muy pequeña del compuesto cuyo punto de fusión se va a determinar en un tubo capilar. Se introduce el tubo en un baño con un medio que permita determinar la temperatura del baño. Cuando se aumenta lentamente la temperatura, se alcanzará el momento en que en

que este provoque la fusión del compuesto en el capilar, procediendo a determinar las temperaturas del comienzo y final de la fusión (Ined, 2006).

8. Cromatografía

La cromatografía es una técnica que permite visualizar y separar los componentes de una mezcla debido de dos efectos: la retención de los componentes por una fase estacionaria y el efecto que ejerce a estos mismos componentes de la mezcla, una fase móvil. Con estos dos efectos, es posible determinar la pureza de un compuesto por técnicas cromatográficas (Ined, 2006).

9. Determinación de la humedad de la ceniza del bagazo de caña.

La humedad es una propiedad que describe el contenido de vapor de agua presente en un gas, el cual se puede expresar en términos de varias magnitudes. Algunas de ellas se pueden medir directamente y otras se pueden calcular a partir de magnitudes medidas. Las tres magnitudes más utilizadas en la metodología de humedad son la humedad relativa, la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de punto de rocío (García, 2018).

La selección de una magnitud de humedad depende de la aplicación. En meteorología la humedad se expresa con la temperatura de bulbo húmedo, en cambio en un cilindro de gas, el contenido de humedad se expresa con la temperatura de punto de rocío. Además, para la humedad relativa se mide en cámaras de humedad o cuartos limpios (García, 2018).

De cada una de las muestras de cenizas húmedas se toman 3 submuestras, se introdujeron en crisoles y se secaron en estufa a 105°C hasta peso constante, y la humedad se calcula por diferencia de peso (Omil, 2007).

Ecuación 7.

Determinación de humedad.

$$\text{Humedad} = \frac{P_{cf} - P_{cs}}{P_{cs}} * 100$$

Fuente: Elaboración propia.

En donde P_{cf} es el peso húmedo de la muestra de ceniza y P_{cs} es el peso seco de la muestra de ceniza (Omil, 2007).

En los materiales la humedad contenida se da debido a la absorción de humedad, la fracción de humedad contenida de forma superficial representa la cantidad de agua retenida por las fuerzas de tensión superficial que almacena la masa de la ceniza, esta se denomina como humedad libre o añadida, y puede ser removida por medio de un secado al aire a temperatura ambiente. La segunda fracción de humedad denominada intrínseca también

llamada humedad intrínseca o higroscópica, esta es la cantidad de agua contenida en la ceniza que se encuentra en equilibrio con la humedad del aire ambiente, o que forma parte de la estructura sólido-cristalina de la ceniza.

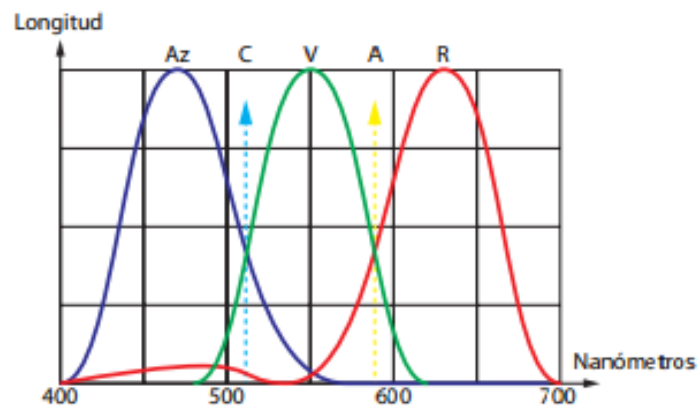
M. Caracterización de aspectos físicos

1. Color

El color se conoce como una sensación enviada y entendida por el cerebro, está inicialmente es una onda electromagnética (luz) en impulso eléctrico. La luz viaja por el espacio en forma de ondas, están compuestas por pequeñas unidades de energía denominadas cuantos. Esta llega al globo ocular, atraviesa la córnea, y da la sensación en cuanto alcanza a un receptor visual. Los seres humanos perciben el color debido a los 6 millones de conos que tenemos en la retina. Existen 3 tipos de conos, y cada uno de ellos es capaz de recibir una determinada longitud de onda, la onda corta es azul, el verde y rojo son onda media y amarillo es onda larga (Cruz, 2018).

Figura 13.

Ondas electromagnéticas visibles para el ojo humano.

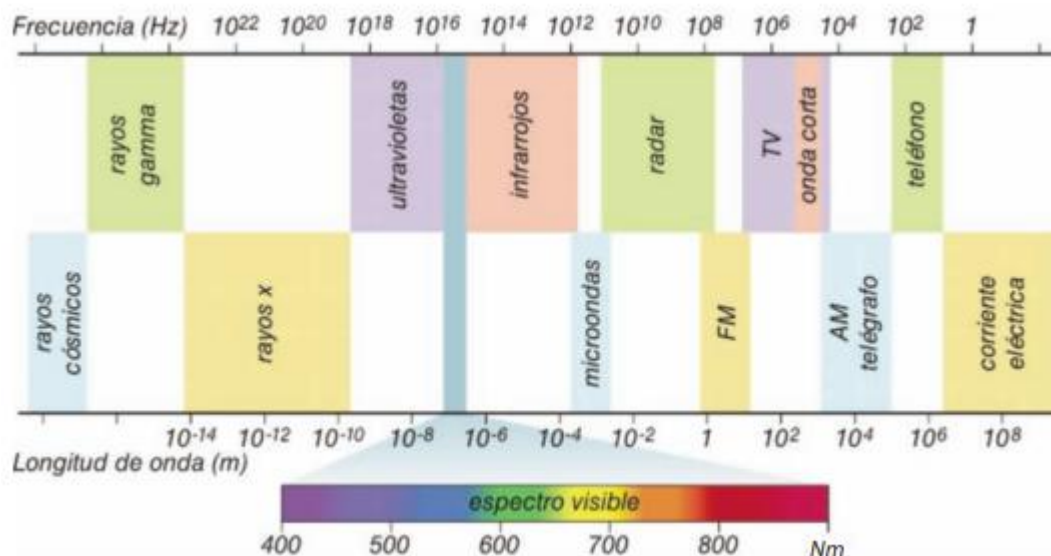


Fuente: (Cruz, 2018).

El arcoíris es el fenómeno físico más llamativo del color. Se produce cuando la luz del sol atraviesa las gotas de agua de lluvia, y estas descomponen la luz blanca de los siete colores del espectro. Heinrich Hertz fue capaz de producir la luz con todas sus propiedades formando ondas electromagnéticas visibles para el ojo humano, además James Clerk demostró que el ser humano solo es capaz de percibir por los ojos ondas electromagnéticas que oscilan entre 380 y 720 nm.

Figura 14.

Espectro UV según longitud de onda y frecuencia.



Fuente: (Cruz, 2018).

2. Peso molecular

La masa atómica de un elemento se conoce como peso atómico, y forma la base práctica para todos los cálculos de pesos químicos. Según el sistema internacional de medida, el mol es la unidad para una de las cantidades dimensionalmente independientes: cantidad de sustancia. Un mol de átomos de cualquier elemento está definido como la cantidad de sustancia que contiene el mismo número de átomos como átomos presentes en 12 gramos de carbono 12 puro. Este número se conoce como el número de Avogadro. 6.02×10^{23} moléculas o átomos en 1 mol (Cruz, 2018).

La masa molar (peso molecular) de una sustancia se define como la masa de un mol de sustancia, expresada en gramos, es decir las unidades de gramos por mol. Para calcular el peso molecular es necesario saber el número de moléculas presentes (Cruz, 2018).

La masa molecular (peso fórmula) es un número que indica cuántas veces la masa de una molécula de una sustancia es mayor a la unidad de masa molecular y sus elementos, se calcula sumando todas las masas atómicas de dicho elemento. Su valor numérico coincide con el de la masa molar, pero expresado en unidades de masa atómica, en lugar de gramos/mol. La masa molecular permite conocer la masa de una molécula, mientras que la masa molar refleja la masa de un mol de compuesto (Cruz, 2018).

3. Coloide

Un coloide es una mezcla no homogénea de dos o más fases (gas, líquido o sólido) en las que una de ellas es menor a un micrómetro. Los sistemas coloidales son la base de un número grande de productos que utilizamos tal como adhesivos, pinturas, helados, mantequilla entre otros (Fernández, 2021).

Para poder definir un sistema coloidal es importante entender el concepto de solución verdadera. Esta es una solución en la que están iones disueltos individuales o moléculas cuyo tamaño es menor a 0.001 micras, que normalmente no llega a precipita fuera de la solución porque la fuerza de atracción que ejerce la gravedad sobre la partícula es muy pequeña. Las partículas están separadas unas de otras y cada una se mueve en forma más o menos independiente en el solvente (Fernández, 2021).

Los sistemas formados con partículas disueltas o dispersas en solventes y que miden desde aproximadamente un nanómetro hasta un micrómetro, son conocidos como sistemas coloidales. Un coloide está constituido por una fase dispersa que es el componente del sistema coloidal que se encuentra dividido en partículas y un solvente que contiene a la fase dispersa (Fernández, 2021).

Aunque el coloide por excelencia es aquel en el que la fase continua es un líquido y la fase dispersa se compone de partículas sólidas, es posible encontrarse coloides cuyos componentes se encuentran en otros estados de agregación. Si bien la separación de los coloides sobre la base de la afinidad de sus micelas por el disolvente no es absoluta, por lo que muchos soles formados, como los óxidos hidratados, se encuentran en un grupo intermedio entre los hidrófobos y los hidrófilos. Estos se pueden diferenciar de la siguiente forma, si era sólido se estaba en presencia de un suspensoide y si era líquido es un emulsoide, siempre y cuando el disolvente fuera líquido [51].

El comportamiento de los coloides hidrófobos e hidrófilos es, en general muy diferente y para poder ubicarlos en su justo término, es preciso tener en cuenta la viscosidad, tensión superficial, efecto Tyndall, presión oncótica, estabilidad y precipitación de cada uno de ellos. La viscosidad y la tensión superficial es similar al medio dispersante; además debido a la gran división y diámetro pequeño de sus micelas, presentan el efecto Tyndall. La viscosidad de los hidrófilos, a causa de su aidez por el agua, es significativamente superior a la fase dispersante. Mientras que su tensión superficial es inferior a la misma. Los hidrófilos no presentan el efecto Tyndall, lo que se explica por su hidrofilia que impide una distinción óptica entre las fases dispersa y dispersante [51].

4. Clasificación de los sistemas coloidales

Los sistemas coloidales cuentan con tres clasificaciones:

Dispersiones coloidales: Estas son termodinámicamente inestables debido a su alta energía libre superficial y son sistemas irreversibles en el sentido de que no se reconstituyen fácilmente después de la separación de las fases (Fernández, 2021).

Soluciones verdaderas de material macromolecular: Estos son termodinámicamente estables en el sentido de que es fácil que se reconstituya después de la separación del soluto y solvente.

Coloides de asociación: Estos pueden ser estables. Las soluciones de materiales con tensoactivos exhiben características físicas inusuales. En una solución diluida actúan como electrolitos normales, pero en soluciones más concentradas presentan serios cambios en las propiedades físicas como la presión osmótica, conductividad eléctrica, turbidez y la tensión superficial. La conductividad eléctrica en las soluciones de tensoactivo iónico sigue siendo relativamente alta (Fernández, 2021).

5. Tipos de coloides de dispersión

Cuadro 5.

Coloides según su fase y tipo.

Fase dispersa	Solvente	Nombre	Ejemplo
Líquido	Gas	Aerosol líquido	Niebla, spray
Sólido	Gas	Aerosol sólido	Humo, polvo
Gas	Líquido	Espuma	Espuma de extintor
Líquido	Líquido	Emulsión	Leche, mayonesa
Sólido	Líquido	Soles	Pasta de dientes
Gas	Sólido	Espuma sólida	Poliestireno extendido, chocolate
Líquido	Sólido	Emulsión sólida	Ópalo, perla
Sólido	Sólido	Suspensión sólida	Plásticos pigmentados

Fuente: (Fernández, 2021).

El interés por los coloides ha aumentado rápidamente debido al requerimiento de componentes electrónicos miniaturizados que el moderno procesamiento de datos solicita. Es generalmente aceptada la alta reproducibilidad de sistemas coloidales y su controlada composición de materiales, por lo que estos materiales son día con día más importantes para desarrollo de nuevos materiales de gran funcionamiento. Los sistemas coloidales tienen una infinidad de aplicaciones, como en jabones, saborizantes de alimentos, látex, pasta dentífrica, quesos, pinturas, gelatinas (Fernández, 2021).

N. Determinación de contenido de compuestos químicos

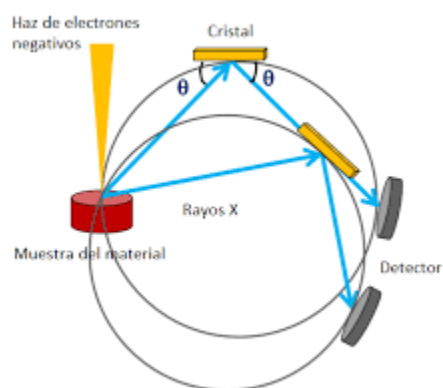
1. Fluorescencia de rayos X

La fluorescencia de rayos X (XRF) es un método elemental no destructivo para el análisis de líquido y sólidos. La muestra es irradiada por un haz de rayos X, causando una emisión de rayos X fluorescente, estos pueden ser detectados utilizando un dispersor de energía o un detector disperso de longitudes de onda. Ya que con las energías y longitudes de ondas emitidas se pueden identificar los elementos presentes en la muestra mientras que la concentración de los elementos es determinada por la intensidad de los rayos X (Santiago, 2018).

La emisión característica de la radiación de rayos X resulta de un electrón de transición que está entre dos cubiertas de un átomo, luego de la ionización. Por ello la técnica XRF puede ser utilizado tanto en análisis cualitativos como cuantitativos de distintos materiales. La mayor parte de estos equipos necesitan el uso de un tubo de rayos X como fuente de energía (Yang, 2018).

Figura 15.

Esquema simple de la fluorescencia de rayos X.

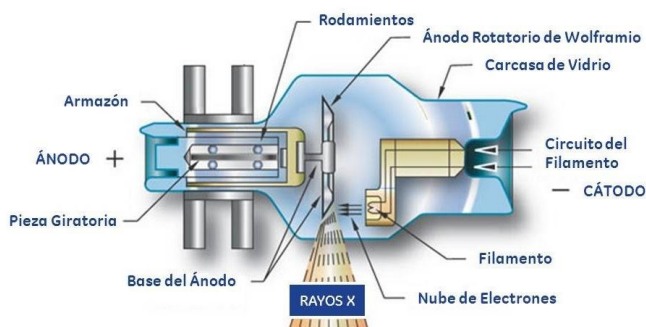


Fuente: (Yang, 2018).

El funcionamiento del método y equipo comienza con una fuente de rayos X que produce energías de miles de electronvoltios. Estos rayos X se generan dentro de un tubo por medio de una aceleración de electrones que se dirigen a una superficie metálica, estos electrones rebotan en la superficie y forman los rayos X (Santiago, 2018).

Figura 16.

Esquema de un tubo de rayos X.

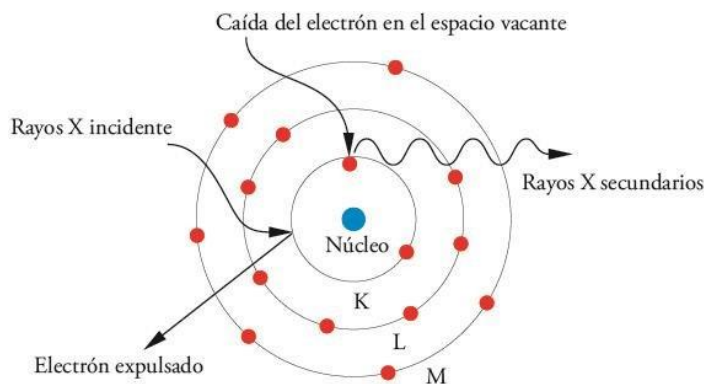


Fuente: (Yang, 2018).

Posterior a la generación de los rayos, estos se ponen en contacto directamente con la muestra, durante este contacto existe una interacción o intercambio con los electrones en el átomo. Finalmente, como resultado de esta interacción, los rayos x que son característicos de cada elemento, son emitidos y analizados. Los electrones de la concha exterior de la concha están menos ligados que los electrones interiores. Cuando los electrones llenan los espacios vacíos de energía y lo que queda de la diferencia de la emitida y utilizada es conservada (Santiago, 2018).

Figura 17.

Esquema del proceso de XRF.



Fuente: (Santiago, 2018).

En la figura anterior podemos observar que los pasos 1 y 2, en donde el rayo x incidente refleja contra la coraza donde hay vacío, mientras que en el paso 3 el electrón llena el espacio vacío y luego, como paso 4 la energía en exceso sale como rayos x fluorescentes (Santiago, 2018).

Los elementos que están en la muestra pueden ser identificadas con la localización o posición de los picos de energía en el eje horizontal. Mientras que en la teoría, el número de

rayos X producidos es proporcional a los números de átomos presentes en la muestra, cuantitativamente se puede determinar mediante la suma de las intensidades de los picos de energía (Santiago, 2018).

2. Método de FTIR

El FTIR es un método bastante común y preferido para la espectroscopia infrarroja. En esta radiación IR pasa a través de la muestra analizada, cierta parte de esta radiación es absorbida por la muestra, mientras que otra parte pasa a través de esta que es transmitida. El espectro resultante representa la absorción y transmisión molecular, creando una huella molecular, esta no puede repetirse, por lo que es única y hace útil este método de análisis para diferentes muestras (Nicolet, 2001).

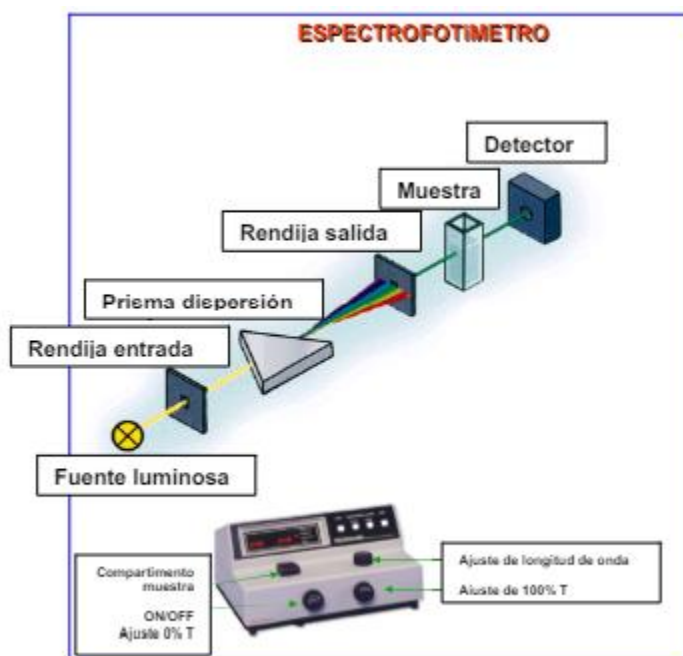
Con el método FTIR se puede obtener distinta información útil para una investigación o trabajo, estos son los siguientes:

- Identificar materiales o compuestos desconocidos.
- Determinar calidad o consistencia de la muestra.
- Determinar la cantidad de componentes en la mezcla analizada.

El espectro infrarrojo es representado por picos de absorción, que corresponden a las frecuencias de vibraciones entre los enlaces de los átomos. Se pueden identificar ya que cada material tiene una combinación única de átomos. La señal resultante de la medición por este método es un interferograma que tiene la propiedad única que todos los puntos de datos tienen información de todas las frecuencias infrarrojas que vienen de la fuente. Posteriormente el CPU interpreta estos interferogramas por medio de la transformada de Fourier obteniendo la información deseada que es un espectro que proporciona por medio de longitudes de onda y transmitancia la presencia de elementos en la muestra (Nicolet, 2001).

Figura 18.

Funcionamiento básico de un FTIR.



Fuente: (Nicolet, 2001).

El proceso de instrumentos para realizar un análisis de FTIR:

Fuente: La energía infrarroja es emitida de una fuente de cuerpo negro, el haz pasa en la apertura que es el que controla la cantidad de energía que se efectúa a la muestra (Nicolet, 2001).

Interferómetro: El haz de luz entra al interferómetro donde el espectro codifica, la señal sale de interferómetro hacia la muestra.

Muestra: El haz entra al compartimento de la muestra donde es transmitida o reflejada en la superficie de esta.

Detector: El haz finalmente pasa por el detector con la medición final, y con esto ya estas

Computadora: La señal medida es digitalizada y enviada a la computadora donde se utiliza la transformada de Fourier para descifrar la señal y convertirla en algo medible y es donde ya el usuario puede analizar e interpretar los datos dados por el equipo (Nicolet, 2001).

Figura 19.

Proceso de instrumentos para realizar un análisis de FTIR.



Fuente: (Nicolet, 2001).

Por medio del espectro se puede observar las intensidades de absorción, normalmente esta es comparada con la muestra en el haz determinado como porcentaje de transmitancia. Por ello es requerido todo el proceso para llegar a obtener lecturas de los componentes de la muestra (Nicolet, 2001).

3. Método de UV/VIS

La espectroscopía UV-VIS se basa en el proceso de absorción de la radiación ultravioleta-visible (radiación con longitud de onda comprendida entre los 160 y 780 nm) por una molécula. La absorción de esta radiación causa la promoción de un electrón a un estado excitado. La espectroscopía UV-VIS se utiliza para la identificación de grupos funcionales presentes en la molécula analizada. Las bandas que aparecen en el espectro son anchas debido a la superposición de transiciones vibracionales y electrónicas (SME, 2023).

Figura 20.

Probeta de fibra óptica con muestra para equipo de UV-VIS.



Fuente: (SME, 2023).

Además de la detección de grupos funcionales en moléculas orgánicas tiene más aplicaciones en la industria química:

- Análisis de muestras bioquímicas.
- Determinación de metales en compuestos de coordinación.
- Análisis de semiconductores.
- Medidas de color.
- Determinación cuantitativa.
- Seguimiento de cinética de procesos químicos y bioquímicos.

El espectrofotómetro UV-Vis moderno utiliza una luz como fuente para iluminar la muestra, y permite que se mida lo que absorba, transmita o refleje a cada longitud de onda. Normalmente genera gráficos de absorbancia y longitud de onda (SME, 2023).

El espectro UV-Vis generalmente muestra picos de absorbancia que tiene una relación proporcional con la concentración de los compuestos en la muestra. A diferencia de otros métodos la espectroscopía UV da información cualitativa limitada, ya que en el espectro es difícil reconocer el compuesto basado en el espectro. Sin embargo, en la teoría se pueden detectar diferentes cromóforos con su respectiva longitud de onda. La mayoría de la absorción por los compuestos orgánicos resultan siendo enlaces PI que son insaturados (Agilent, 2023).

Cuadro 6.

Principales cromóforos en lectura de espectro UV-VIS.

longitud de onda aproximada	color de luz que se absorbe	color de luz que se refleja o ve
390 - 435	Violeta	Amarillo verdoso
435 - 490	Azul	Amarillo
490 - 580	Verde	Rojo
580 - 595	Amarillo	Azul
595 - 650	Naranja	Azul verdoso
650 - 780	Rojo	Verde azulado

Fuente: (SME, 2023).

La presencia de una banda de absorbancia a una longitud de onda específica es un buen indicador de la presencia de un cromóforo. Sin embargo, la posición de absorbancia máxima no es ajustada ya que depende del ambiente molecular del cromóforo. Otros parámetros que pueden afectar en la lectura es el pH y la temperatura, estos pueden cambiar la intensidad y la longitud de onda (Agilent, 2023).

Un factor para tomar en cuenta que en la prueba no se logra identificar si hay algún compuesto desconocido, este es utilizado y medido con un espectro de referencia de compuestos ya existentes. Por lo que normalmente es comúnmente utilizado para cuantificar concentraciones de una mezcla conocida, donde se puede medir el contenido de la muestra (Agilent, 2023).

4. Absorción atómica

La espectrometría de absorción atómica es un método para detectar diferentes elementos tanto las muestras líquidas como sólidas por medio de radiación de ondas electromagnéticas características. Cada elemento absorbe diferentes longitudes de onda, dando como resultado una absorbancia que ya está estandarizada y medida por cada elemento, para reconocer el contenido de la muestra. En este método los analitos son atomizados en donde sus longitudes de ondas características son emitidas y grabadas (Fisher, 2023).

Luego durante la excitación, los electrones se mueven a un nivel más alto de energía al momento que los átomos absorben la energía específica de la luz. Y esta energía es la que representa la longitud de onda específica que caracteriza al elemento analizado. Un método alternativo es la espectrometría de flama que también es aceptada en la industria y proporciona un resultado cuantitativo (Fisher, 2023).

Componentes básicos de un equipo de absorción atómicos son los siguientes: Fuente radiante, atomizador, monocromador, detector, amplificador y sistema de presentación (Razmilic, 2018).

La fuente radiante más común utilizada para mediciones de absorción atómica es la lámpara de cátodo hueco. En la EAA se utilizan atomizadores con y sin llama con el fin de producir átomos libres del metal en el haz de la radiación (Razmilic, 2018).

Los espectrofotómetros de absorción atómica generalmente poseen monocromadores de red con montaje de Littrow o Czerny, que permiten aislar una línea de resonancia del espectro emitido por la lámpara de cátodo hueco. Como detector se utiliza un fotomultiplicador que produce una corriente eléctrica, que es proporcional a la intensidad de la línea aislada del monocromador. El amplificador, que funciona como puente para amplificar la señal hacia un dispositivo de lectura como un voltímetro digital (Razmilic, 2018).

Método analítico de absorción atómica de silicatos y carbonatos: Procedimiento de fusión de metaborato de litio.

Este método describe la determinación de diferentes metales en silicatos y carbonatos (Elmer, 1996).

Ñ. Economía circular

La economía circular es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar los materiales y productos existentes todas las veces posibles para crear un valor añadido en el mismo. Con el fin de extender el ciclo de vida de los productos (López, 2019).

En la práctica, implica utilizar todos los residuos posibles y reducir el desecho de este. Cuando un producto llega al final de su vida, sus materiales se mantienen dentro de la economía siempre que sea posible gracias al reciclaje. Estos pueden ser reutilizados creando, así como se mencionó anteriormente un valor adicional (López, 2019).

Figura 21.

Modelo economía circular: menos materias primas, menos residuos, menos emisiones.



Fuente: (López, 2019).

En la figura anterior, se observa la serie de pasos a seguir para llevar a cabo un modelo de economía circular. La reutilización y reciclaje de productos ralentizarían el uso de recursos naturales, reducen la alteración de la naturaleza y hábitat, y ayudarían a limitar la pérdida de biodiversidad (López, 2019).

Otro beneficio de la economía circular es la reducción de emisiones anuales totales de gases de efecto invernadero. Los procesos industriales y uso de productos causan aproximadamente el 10% de la GEI, mientras que la gestión de residuos representa el 3.32%. Si desde el comienzo se crean productos más eficientes y de forma sostenible, ayudaría a reducir el consumo de energía y recursos, debido a que se estima que el 80% del impacto ambiental se produce en la etapa de diseño (López, 2019).

Hoy en día, hay mucha dependencia de materias primas entre países ya que, en los últimos años, la demanda ha aumentado significativamente además que existe una escasez de recursos, ya que varias de las materias primas son finitas. El reciclaje de materias primas reduce los riesgos asociados al suministro, como la volatilidad de precios, disponibilidad y dependencia de importaciones (López, 2019).

1. Potencialidades del sector de residuos en sus eslabonamientos productivos

En el marco de la economía circular, no solo los residuos pasan a ser recursos, sino también el sector productivo que los gestiona tiene un gran potencial para arrastrar a otros sectores de la economía. El sector de residuos puede ser un elemento generador de mayor actividad económica en los países de la región. Este sector se compara entre países mediante la estructura de tasas de reciclaje y sector de gestión de residuos (Cepal, 2020).

Se pueden observar beneficios de diferentes sectores, por ejemplo, el peso relativo del sector de residuos en la región de América latina y el Caribe es heterogéneo. Todo esto depende tanto del grado de madurez sectorial como de los servicios que existen y que se contabilizan en el Sistema de Cuentas Nacionales. Estos pueden ser medidos por matrices de insumo-producto del país que se quiere analizar (Cepal, 2020).

O. Métodos estadísticos

1. Box Behnken Design

El BBD es un método multivariable estadístico que es utilizado para diseños experimentales basándose en la metodología de superficie de respuesta. En las optimizaciones multivariadas existen dos tipos de variables: las respuestas que son las variables dependientes y los factores, que son las variables independientes. Sus respectivos valores dependen de los niveles de los factores determinados. Este método se utiliza con diseños rotativos de segundo orden basado en tres niveles incompletos de diseño factorial, se caracteriza por ser en tres dimensiones dado por las variables determinadas en la experimentación.

Para tres factores las gráficas representadas se visualizan de esta forma. En la figura # se puede observar un diseño factorial 2^2 . El número de experimentaciones (N) para el desarrollo de la BBD es definida por la siguiente ecuación:

Ecuación 8.

Factores para el análisis estadístico.

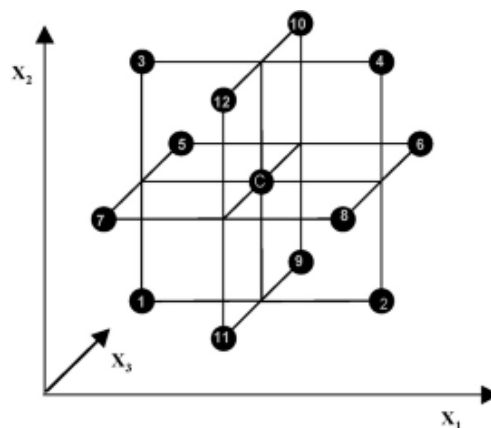
$$N = 2k(k - 1) + Co$$

Fuente: Elaboración propia.

Donde k es el número de factores y Co es el número de puntos centrales, que son los que se observan en la figura 22.

Figura 22.

Diseño factorial 2^2 y punto central distribuido en tres dimensiones.



Fuente: (Brooks, 2023).

El BBD en comparación con otros métodos de metodología de superficie de respuesta se ha demostrado que el BBD y la matriz de Doehlert son las más eficientes, debido a que por ejemplo el BBD tiene la ventaja de que no contiene combinaciones en donde todos los factores tienen los máximos o mínimos parámetros simultáneamente, haciendo que los experimentos no rindan bajo condiciones extremas. Y su distribución es bastante ordenada por medio de la caja formada como se observa en la Figura 22. Para esto se hace un sistema de variables en donde los factores se van variando a diferentes niveles, mostrando la relación entre los factores y las variables de respuesta. Se puede afirmar por varias fuentes que el Box Behnken es un método estadístico efectivo para determinar valores óptimos con diferentes combinaciones de variables.

2. Response Surface method

La metodología de superficie de respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas muy útiles para la modelación y análisis de problemas con distintas variables, con el fin de poder determinar las mejores condiciones de operación de un proceso o fenómeno. Por ejemplo, se pueden encontrar los niveles de temperatura y presión para maximizar el rendimiento del proceso. En donde el rendimiento está en función de las variables independientes, en donde es representada como la función (Brooks, 2023).

$$Y = f(x_1, x_2) + \text{error.}$$

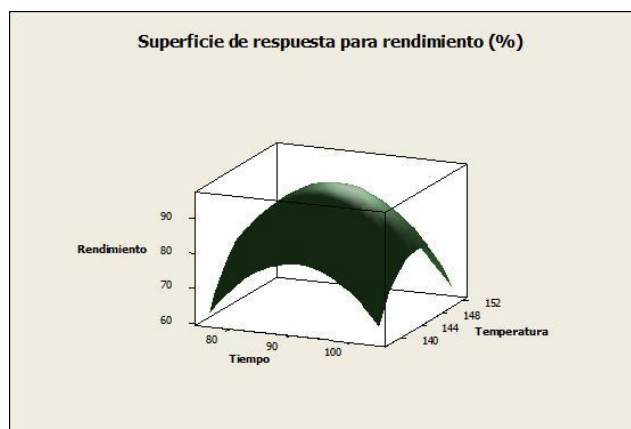
$$E(y) = f(x_1, x_2)$$

En donde el error se representa en la respuesta y , que en este caso es el rendimiento. Normalmente, la superficie de respuesta se representa en forma gráfica, en donde $E(y) = f(x_1, x_2)$

Normalmente la metodología de superficie de respuesta se representa de forma gráfica como se puede observar en la figura 23 se observa la gráfica de tres dimensiones en donde se compara el rendimiento esperado (n) en función a los dos factores independientes, en este caso la temperatura y presión. Para determinar la superficie se utiliza el box behnken que es diseño de tres niveles que coinciden con a superficie de respuesta. Este consiste en la combinación de las factoriales 2^k con un diseño de bloque incompleto (Brooks, 2023).

Figura 23.

Superficie de respuesta de tres dimensiones mostrando el rendimiento esperado en función de la temperatura (x_1) y presión (x_2).

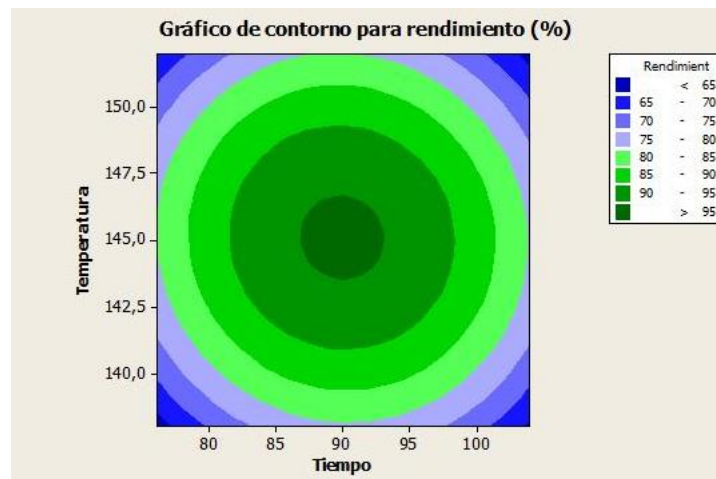


Fuente: (Brooks, 2023).

Además, en la figura 24 se puede observar la gráfica de contorno que muestra los puntos en donde se observa el punto máximo y las condiciones de operación (Brooks, 2023).

Figura 24.

Gráfico de contorno de una superficie de respuesta.



Fuente: (Brooks, 2023).

Una gráfica de contorno es una herramienta estadística que tiene la función de explorar la relación potencial entre tres variables, estas muestran la relación tridimensionalmente en dos dimensiones, en donde se muestran los factores X y Y, en este caso las variables independientes y los valores de respuesta se representan mediante contornos. Los contornos se pueden representar mediante áreas sombreadas, líneas de contorno o ambas. Como se observa en la siguiente figura se realiza la relación entre dos variables independientes y los contornos con colores representan la variable de respuesta (Minitab, 2023).

Figura 25.

Líneas de contorno y área mostrando relación entre tres variables.

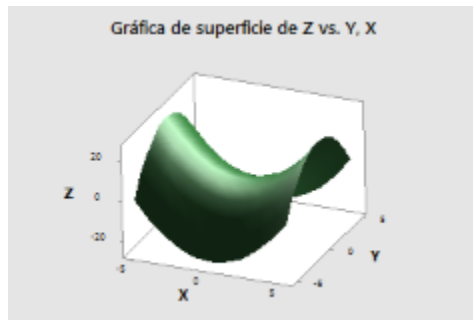


Fuente: (Minitab, 2023).

Las gráficas de superficie 3D y de malla 3D son gráficas que se pueden utilizar para explorar de igual manera la relación potencial entre tres variables, sin embargo, a diferencia de una gráfica de contorno esta se representa en tres dimensiones, las variables predictoras se muestran en el eje X y Y, mientras que la variable de respuesta se representa como una superficie lisa o cuadrícula (Minitab, 2023).

Figura 26.

Gráfica de superficie 3D.



Fuente: (Minitab, 2023).

3. Anova

El análisis de varianza es un modelo estadístico que se utiliza para comparar las varianzas entre las medias de diferentes grupos. Una variedad de contextos lo utilizan para determinar si existe alguna diferencia entre las medias. El resultado de la anova es la estadística “f”. Esta relación muestra la diferencia entre la varianza dentro del grupo y la varianza entre grupos, lo que finalmente produce una cifra que permite que la hipótesis nula es respaldada o rechazada. Si hay una diferencia significativa entre los grupos, la hipótesis nula no es compatible y la razón de F será mayor (Tibco, 2022).

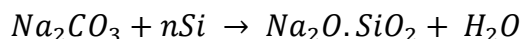
V. Antecedentes

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones y experimentaciones acerca de la producción o extracción de sílice precipitada. Se ha demostrado que existen diferentes métodos para producir la sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña, además otra materia prima utilizada es la ceniza de cáscara de arroz que cuenta con propiedades similares a la del bagazo de caña (Todkar, 2016). Según Todkar et al. Existen diversos métodos descritos a continuación:

El método convencional para la manufactura de la sílice a partir del cuarzo o arena que es quemado en una caldera, utilizado para producir vidrio la reacción se da a 1400°C y se da mediante la siguiente reacción:

Ecuación 9.

Reacción de producción de sílice.



Fuente: Elaboración propia.

El proceso requiere de mucha energía y proporciona una baja pureza de sílica

También está la cáscara de arroz que es sometida a pirólisis con el fin de remover compuestos volátiles como hidrógeno, dióxido de carbono y monóxido. El carbón reacciona simultáneamente con el vapor sobrecalentado convierte todo a gases aproximadamente a 700°C. Este proceso es altamente caro debido al alta energía que se necesita para llevar a cabo la pirólisis (Todkar, 2016).

Otra alternativa es tratando la cáscara de arroz con ácido fluorhídrico que da como resultado H_2SiF_6 a este amonio es agregado para proporcionar un complejo $(NH_4)_2SiF_6$ y se descompone en NH_4F y SiO_2 . El filtrado reacciona con un ácido fuerte para obtener HF que se puede reciclar. La sílice obtenida contiene una pureza del 99% (Todkar, 2016).

En otro artículo, se menciona que Haq et al. Evaluaron el efecto de las variables experimentales en la extracción de sílice a partir de ceniza de cáscara de arroz, en este realizaron mezclas acuosas de 30-250g/L de RHA y 0.2-1.2mol/L de hidróxido de sodio, estas fueron calentadas con reflujo, se filtraron y finalmente se acidificaron para obtener la sílice precipitada y como subproductos se obtuvo agua y sulfato de sodio. Observaron que los rendimientos se vieron afectados por diferentes variables como, la concentración de hidróxido utilizada, tiempo de reflujo, relación de cantidades con hidróxido y ceniza, estado de ceniza y propiedades de la misma. Para finalmente caracterizarla con métodos de FTIR, XRD, XRF entre otras (Haq, 2014).

Según Kalapathy et al. existe un método simple para la producción de sílice pura. Ellos trabajaron en la extracción en un medio alcalino como silicato que fue precipitado para formar sílica gel mediante una acidificación. Luego calentaron la sílica gel a 80°C por 12

horas, obteniendo sílica xerogel amorfa. En otra fuente se puede encontrar que realizaron la extracción con el mismo procedimiento anterior solamente que acidificaron las soluciones de RHA- silicato extraído con diferentes ácidos. Y se encontró que la composición elemental de la sílica precipitada gelatinosa dependió de la composición del ácido utilizado y sus procesos de lavado (Kalapathy, 2000).

Della et al. realizó diferentes intentos de extraer la sílice de la ceniza de cáscara de arroz. Los autores antes de realizar la extracción quemaron derivados de la ceniza que contenían material de carbono a varias temperaturas con diferentes tiempos de combustión. Con esta experimentación se pudo confirmar que el tratamiento y la combustión de la cáscara de arroz afecta el contenido de sílice en las muestras de ceniza. Se llegó a la conclusión que la extracción del 95% de sílice se dio a una temperatura de 700°C (Della, 2002).

Existen también diferentes usos para la ceniza de bagazo de caña, por ejemplo, Arbeláez et al. propuso un estudio en donde se evalúa el efecto de la incorporación de la ceniza en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuo de vidrio. Se encontró que la incorporación de CBC y RV no afectó directamente la densidad del hormigón debido a que cuentan con densidades similares, la resistencia a compresión aumentó con la incorporación de CBC, la mezcla 3:1 presentó la mayor resistencia a compresión. Y las emisiones de dióxido de carbono disminuyeron con la incorporación de ceniza, por lo que el hormigón modificado con estos compuestos son una opción potencial para aprovechar los residuos y reducir emisiones del dióxido de carbono (Arbeláez et Al, 2022).

González I. encontró una forma de atenuar las extracciones de nutrientes en los cultivos es devolviendo las cenizas resultantes de combustión de biomasa al suelo. De esta manera se restituyen parte de los elementos minerales que fueron extraídos durante su explotación. Se demostró que la riqueza de potasio en cenizas de sarmiento es del 28% y las cenizas del cardo es del 15%. Ya que, con los fertilizantes potásicos, específicamente la ceniza aporta elementos primarios como fósforo y potasio, incluye también de otros elementos secundarios como calcio y magnesio (González, 2022).

Otros autores, como Huang et al. extrajeron sílice a partir de la cáscara de arroz en un lecho fluidizado. Para este propósito ellos quemaron la cáscara de arroz en un lecho fluidizado en condiciones controladas. La ceniza producida fue sujeta a una purificación y luego usar la ceniza purificada para extraer la sílice precipitada. La cantidad de sílice obtenida por este método tuvo mejores propiedades que los métodos por precipitación. Otro tratamiento que se le hace a la ceniza de cáscara de arroz se realizó con glicerol para obtener una solución de glicosilato (Wittayakun, 2008). Paya et al. tituló esta solución con una solución de glicerol acuosa. EL producto final obtenido fue un polvo blanco que se torna como sílice amorfa (Payá, 2001).

Una aplicación muy utilizada para las cenizas de biomasa se ha utilizado es una alternativa en bloques de construcción. Investigadores de la Escuela Politécnica Superior de Linares de la UJA evaluaron la viabilidad de utilizar las cenizas procedentes del proceso de combustión de biomasa como material alternativo al cemento en la elaboración de cemento.

Las pruebas se han evaluado utilizando diferentes adiciones de cenizas para determinar el efecto que tiene sobre propiedades químicas, físicas, mecánica y mineralógicas de las muestras mediante sustitución del cemento portland, se concluyó que la mejor relación en cuanto a propiedades del cemento fue 1:1 (Andalucía, 2014).

En otro artículo, se realizó una producción de sílice precipitada por medio de un patenta por el Institute of Science Precipitated Silica en donde los químicos son utilizados son regenerados para reciclar y utilizarlos en un ciclo. Diversos estudios han sido exitosos con la extracción de sílice tanto a escala laboratorio como escala piloto, que han dado requerimientos para hacerlo de manera industrial. El rendimiento obtenido de la sílice en este proceso es del 70% que representa también una conversión de 80 a 90% de sílice en la ceniza. El procedimiento que se siguió fue descrito por los pasos más importantes como la digestión, filtración de la ceniza, precipitación, filtración de sílice y regeneración de solución (Subbukrishna, 2007).

Autores como Pengthamkeerati et al. realizaron una extracción de sílice mediante un tratamiento hidrotérmico alcalino y precipitación de la sílice utilizando ácidos orgánicos, otra forma de extraer la sílice precipitada. En este se describe que se encontró la mejor condición para extraer la sílice, en esta se utilizó una solución de NaOH 3.0M con la ceniza de bagazo de caña con una relación de ceniza-solución 1:10g/ml a 90°C en un tiempo de 24 horas. Los estudios indicaron la importancia de las variables analizadas en el artículo. La precipitación de sílice por medio de ácido cítrico y a condiciones de pH 4, son las adecuadas para obtener el producto con más pureza de sílice con una composición del 95.6%. Estos fueron analizados en rayos X de fluorescencia (Pengthamkeerati, 2018).

Yao Zhi-tong realizó una preparación y caracterización de sílice blanca a partir de cenizas volantes. Esta fue comprimida en la mezcla alcalina de cenizas seguida de una extracción con ácido hidro clorhídrico. Las concentraciones de ácido, tiempo de reacción, relación de reactivos y rendimientos fueron determinados. La sílice blanca es altamente refinada y se caracteriza por estar hidratada que forma grupos hidroxilo, lo cual hace que la característica química sea estable y tenga excelentes propiedades. [30] Primero se realizó una activación, en donde la ceniza fue mezclada con carbonato de sodio anhidro con relación 1:0.5 y molido por 2 horas. La mezcla fue calcinada en un horno a 950°C por 1.5 horas. En el proceso de extracción el producto se agrega a un balón con agitación. SE preparó con diferentes concentraciones de ácido, relaciones, tiempos de reacción y velocidades de agitación (Yao, 2010).

En el estudio de Fardhyanti et al. la ceniza de bagazo de caña es un residuo utilizado para la extracción del polvo de sílice. Este polvo puede ser utilizado como absorbente para la purificación del etanol. Antes de usarla esta fue lavada con soluciones de ácido clorhídrico. Posterior a la reacción con hidróxido, ellos la filtraron, la acidificaron, se secó hasta que el peso fuera constante, quiere decir que ya no obtuvo humedad. El mayor rendimiento que se obtuvo fue de 45.5% que fue alcanzado con una solución 2 mol/L de NaOH durante 90 minutos. El área de superficie, el diámetro del poro y volumen poro del polvo de la sílice fue medida. El polvo de la sílice tuvo aplicaciones y pruebas como adsorbente en la adsorción-

destilación, en donde se logró una concentración de 99.3% (p/p) que indica que el punto azeotrópico puede ser pasado (Fardhyanti, 2018).

En otro estudio del Arabian Journal of Chemistry de Elanthikkal et Al. realizaron una extracción de biosílice a partir de ceniza de palma datilera. Además, se muestra su aplicación en la fotocatalisis. Este estudio explora la extracción de la sílice pura en nanopartículas. Utilizó el método para la extracción, el primero fue sol-gel o combustión térmica. Las nanopartículas de sílice fueron caracterizadas por EDX, FT-IR, XRD, SEM, BET y TGA. La muestra de biosilice químicamente sintetizada mostró una pureza del 98% y un área de superficie grande comparada con la biosílice preparada térmicamente con un valor de 376 m²/g. En la parte de la aplicación de fotocatalisis, la eficiencia de la degradación de teñido de la muestra de biosilice preparada por síntesis fue del 82% mientras que la sílice contó con 74% (Elanthikkal, 2022).

Banoth S. realizó una extracción termoquímica de manera sostenible de sílice amorfa a partir de residuos biológicos. El objetivo de este artículo es la utilización de la cáscara de arroz con cero residuos que contienen sílice como mayor componente en su forma amorfa utilizado normalmente para reforzar o cambiar propiedades de materiales. Primero se quemó la cáscara de arroz bajo condiciones controladas luego de remover los iones metálicos que llevó a obtener sílice blanca con alta pureza (Banoth, 2021).

El método de extracción de la sílice amorfa fue un proceso de pirólisis termoquímica. La sílice fue caracterizada por un análisis de difracción de rayos X en donde se demuestra la presencia de sílice en forma amorfa. En el FTIR se demostraron en los picos la presencia de siloxano y grupos silanos. Y en otra muestra que se sometió a UV-visible (absorción) con una banda máxima de 367nm demostrando el espectro de fotoluminiscencia, observando una diferencia con la nano sílice teórica (Banoth, 2021).

La caracterización tanto de materia prima como del producto es de vital importancia Morales, A. realizó una caracterización por espectroscopía en el infrarrojo de óxidos de silicio depositados en ambiente de N₂O. De esta manera se puede obtener y detectar la presencia de óxidos de silicio, a diferentes condiciones en este caso con variación de temperatura y de presión en un rango determinado por el autor. Para realizar la medición las muestras en forma de obleas cristalinas de silicio se introdujeron en un horno para su oxidación térmica en ambiente de óxido nitroso (Morales, 2003).

Mediante estudios previos realizados se hizo la identificación tres bandas de absorción características del dióxido de silicio estequiométrico en 1080, 800 y 450 cm⁻¹, los cuales corresponden a los modos de enlace Si-O, mientras que el pico ubicado en 459 cm⁻¹ que corresponde al modo de vibración de balance de enlaces de Si-O (Morales, 2003).

VI. Metodología

A. Diseño experimental para la caracterización de la ceniza y productos intermediarios del proceso de producción.

Análisis granulométrico

1. Tomar como muestra 100 gramos de ceniza y pesarlos en la balanza analítica.
2. La ceniza se coloca en el tamizador del Laboratorio de operaciones unitarias en el plato de número de mesh más grande.
3. Se pone a tamizar en un tiempo durante 10 minutos.
4. Luego, se pesan los tamices por separado y su contenido de ceniza que fue quedando en cada uno de ellos.
5. Al obtener estos datos, se calcula el porcentaje que pasó en cada tamiz, permitiendo realizar el análisis granulométrico gráficamente colocando el porcentaje que pasó en el eje Y, el tamaño de partícula en el eje X. Estos con el fin de determinar el comportamiento y la distribución que tiene la muestra de ceniza analizada.

Determinación de humedad

1. Para obtener los datos de humedad se toman tres muestras de 10 gramos de ceniza en triplicado, estos se pesan inicialmente para obtener los datos de referencia, luego se colocan en un secador a 100°C durante un tiempo de 6 horas.
2. Periódicamente tomar pesos de las muestras cada 20 minutos para observar el cambio por contenido de humedad.
3. Estas mediciones se realizan hasta que la temperatura se hizo constante y por medio de las diferencias de pesos entre la muestra inicial y final para determinar la humedad contenida en la muestra.

Posteriormente se realiza el cálculo de humedad en la muestra mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 10.

Cálculo de humedad.

$$\omega(\%) = \frac{W_w * 100}{W_s}$$

W_w = peso de agua en la muestra.

W_s = peso de sólido seco en la muestra.

Fuente: Elaboración propia.

Esto representa la proporción porcentual entre la fase líquida (agua) y sólida de la muestra. Ya con ello se pudo determinar un promedio de la humedad que existe en toda la

ceniza utilizada para la producción de sílice precipitada. Esto afecta directamente en la pureza de la ceniza, ya que dependiendo la cantidad de humedad que se tenga puede tener mayor proporción de sílice en la muestra experimental.

Contenido de la ceniza

La muestra se somete en medio de fluorescencia de rayos x, en donde se describe los compuestos presentes en la ceniza, que en este caso también se midió el Loss of Ignition en la muestra para ver el comportamiento y tener una mejor referencia de que compuestos contiene. La muestra de ceniza analizada fue enviada a Cementos Progreso para poder determinar la composición de la ceniza y observar que cantidades estuvieron disponibles como materias primas y que pudieron extraerse.

B. Diseño experimental a escala laboratorio de producción de sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña

Esta es la metodología a la que se llegó posterior a una profunda investigación en la parte teórica y experimentación para definir parámetros de operación como resultados para respaldar la obtención de sílice precipitada por este medio. Es importante destacar que se realizaron diferentes muestras con variación de parámetros para comprobar la trazabilidad de la sílice y definir el proceso de forma que pueda ser replicado así poder obtener el producto terminado deseado.

Para la validación del método es importante hacerlo significativo en donde se muestre la repetibilidad y sea representativo para que el método se pueda estandarizar y pueda utilizarse en procesos de planta piloto, investigaciones y en la industria. Este método tiene el valor agregado de promover la economía circular. Por lo que para validarlo se necesita realizar una mejora de proceso y aplicar el valor agregado de la materia prima en función al producto obtenido para el uso en la industria y diferentes sectores.

Cuadro 7.

Reactivos para la producción de sílice precipitada

Reactivo	Cantidad
Ceniza de bagazo de caña	15.000 g (± 0.001 g)
Hidróxido de potasio puro	10.000 g (± 0.001 g)
Agua destilada	200.00 ml (± 0.05 ml)
Ácido clorhídrico al 29.5% (v/v)	100.00 ml (± 0.05 ml)

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 8.

Cristalería y equipos para la producción de sílice precipitada

Cristalería/equipo	Cantidad
Balón de laboratorio	1 unidad de 500.00 ml (± 0.250 ml)
Condensador	1 unidad de 50.17 cm (± 0.05 cm)
Sistema de reflujo (kit de destilación)	1 unidad
Kitasato	1 unidad de 1000.0 ml (± 0.8 ml)
Filtro Buchner	1 unidad
Mangueras	3 unidades de 5.00cm (± 0.05 cm) de diámetro
Bomba de vacío	1 unidad
Papel filtro	5 unidades de 10cm (± 0.05 cm) de diámetro
Potenciómetro	1 unidad
Beakers	3 unidades de 50ml
Erlenmeyer	1 unidad de 250ml (± 12.5 ml)
Estufa con agitador magnético	1 unidad
Balanza analítica	1 unidad
Probeta	1 unidad de 50.0ml (± 0.2 ml)
Bureta	1 unidad de 50.0ml (± 0.050 ml)

Fuente: Elaboración propia.

1. Pesar en la balanza analítica 15.000 gramos (± 0.001 g) de ceniza junto con 10.000 gramos (± 0.001 g) de hidróxido, siendo una relación 1.5 ceniza/hidróxido.
2. Con una probeta depositar 180 ml (± 0.2 ml) de agua destilada al balón de 500ml (± 0.250 ml).
3. Agregar la ceniza, el hidróxido de potasio y agitador magnético al balón de 500ml (± 0.250 ml).
4. Armar el kit de destilación con las respectivas piezas, el balón unido al condensador y termómetro para control de la temperatura, todo esto arriba de una estufa con agitación.
5. Se coloca en reflujo los reactivos utilizados durante 165 minutos a 85.0°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) de temperatura esto con el fin de obtener el silicato de potasio.
6. Posterior al reflujo, el producto obtenido se filtra al vacío debido a que se quiere separar el carbono y otros componentes del poli silicato de potasio obteniendo una solución altamente alcalina (en un rango de pH 13-14).
7. El producto que queda en el balón de 500 ml (± 0.250 ml) se lava con 20 ml de agua para filtrar y sacar la mayor cantidad de solución alcalina.

8. Analizar las muestras de poli silicato de potasio para observar la cantidad de silicato obtenido de la reacción.
9. Acidificar la solución alcalina con ácido clorhídrico en una bureta, utilizando agitación para formar el precipitado deseado.
10. Luego, filtrar la solución acidificada para separar el líquido y sólido, en este caso es el cloruro de potasio que puede ser utilizado como fertilizante y la sílice precipitada.
11. Secar sílice precipitada en el sol o en un horno durante un tiempo determinado para obtener el sólido deseado.

C. Diseño experimental en la producción de sílice precipitada por medio de diferentes parámetros para el reflujo.

Para la determinación de los mejores parámetros para la producción de sílice precipitada se utilizó un Box Behnken Design, lo cual ayudó a observar el efecto de las variables seleccionadas que en este caso son:

- Tiempo de reflujo
- Relación de cantidad de ceniza e hidróxido
- Temperatura

Para realizar el reflujo de la reacción y formar silicato a partir de cenizas se utilizaron varios materiales y equipo que se pueden encontrar en los cuadros 8 y 9:

Cuadro 9.

Reactivos para la producción de silicatos.

Reactivo	Cantidad
Ceniza de bagazo de caña	100.000 g (± 0.001 g)
Hidróxido de potasio puro	100.000 g (± 0.001 g)
Agua destilada	1500 ml

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 10.

Cristalería y equipos para la producción de silicatos.

Cristalería/equipo	Cantidad
Balón de laboratorio	1 unidad de 500 ml (± 0.250 ml)
Condensador	1 unidad de 50.17 cm (± 0.05 cm)
Sistema de reflujo (kit de destilación)	1 unidad
Kitasato	1 unidad de 1000.0 ml (± 0.8 ml)
Filtro Buchner	1 unidad
Mangueras	3 unidades de 5.00 cm (± 0.05 cm) de diámetro
Bomba de vacío	1 unidad
Papel filtro	5 unidades de 10.0 cm (± 0.05 cm) de diámetro
Potenciómetro	1 unidad
Beakers	3 unidades de 50ml
Erlenmeyer	1 unidad de 250ml (± 12.5 ml)
Estufa con agitador magnético	1 unidad
Balanza analítica	1 unidad
Probeta	1 unidad de 50ml (± 0.2 ml)

Fuente: Elaboración propia.

Para la experimentación se realizan 15 corridas en donde se hace una variación de variable mientras que las otra se mantiene constante, esto con el fin de determinar el punto óptimo de producción y se pueda obtener el mayor rendimiento posible.

Para evaluar el parámetro de tiempo de reflujo se realiza el siguiente procedimiento:

1. Pesar en la balanza analítica 10.000, 15.000 y 20.000 (± 0.001 g) gramos de ceniza junto con 10.000 y 20.000 (± 0.001 g) gramos de hidróxido de potasio.
2. Con una probeta depositar 180 ml de agua destilada al balón de 500ml.
3. Agregar la ceniza, el hidróxido de potasio y agitador magnético al balón de 500ml.
4. Armar el kit de destilación con las respectivas piezas, el balón unido al condensador y termómetro para control de la temperatura, todo esto arriba de una estufa con agitación.
5. Poner a reflujo los reactivos utilizados durante 165 minutos a 80.0°C, 85.0°C y 90.0°C (± 0.5 °C) de temperatura esto con el fin de obtener el silicato de potasio.
6. Posterior al reflujo, el producto obtenido se filtra al vacío debido a que se quiere separar el carbono y otros componentes del polisilicato de potasio obteniendo una solución altamente alcalina (pH 13-14).

En este procedimiento el tiempo de reflujo se mantiene constante, en donde se varía la temperatura y la relación de ceniza/KOH en cantidades de reacción para obtener resultados de eficiencia en cinco corridas.

Para realizar el reflujo de la reacción y formar silicato a partir de cenizas con relación constante se utilizaron varios materiales y equipo que se pueden encontrar en los cuadros 10 y 11:

Cuadro 11.

Reactivos para la producción de silicatos.

Reactivo	Cantidad
Ceniza de bagazo de caña	100.000 g (± 0.001 g)
Hidróxido de potasio puro	100.000 g (± 0.001 g)
Agua destilada	1500 ml

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 12.

Cristalería y equipos para la producción de silicatos.

Cristalería/equipo	Cantidad
Balón de laboratorio	1 unidad de 500 ml (± 0.250 ml)
Condensador	1 unidad de 50.17 cm (± 0.05 cm)
Sistema de reflujo (kit de destilación)	1 unidad
Kitasato	1 unidad de 1000 ml (± 0.8 ml)
Filtro Buchner	1 unidad
Mangueras	3 unidades de 5.00 cm (± 0.05 cm) de diámetro
Bomba de vacío	1 unidad
Papel filtro	5 unidades de 10.00 cm (± 0.05 cm) de diámetro
Potenciómetro	1 unidad
Beakers	3 unidades de 50ml
Erlenmeyer	1 unidad de 250ml (± 12.5 ml)
Estufa con agitador magnético	1 unidad
Balanza analítica	1 unidad
Probeta	1 unidad de 50ml (± 0.2 ml)

Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar la variable de relación entre ceniza e hidróxido de potasio se realiza el siguiente procedimiento:

1. Pesar en la balanza analítica 20.000 gramos (± 0.001 g) de ceniza junto con 20.000 gramos (± 0.001 g) de hidróxido de potasio.
2. Con una probeta depositar 180 ml de agua destilada al balón de 500ml (± 0.250 ml).

3. Agregar la ceniza, el hidróxido de potasio y agitador magnético al balón de 500ml (± 0.250 ml).
4. Armar el kit de destilación con las respectivas piezas, el balón unido al condensador y termómetro para control de la temperatura, todo esto arriba de una estufa con agitación.
5. Se coloca en reflujo los reactivos utilizados durante 90, 165 y 240 minutos a 80°C, 85°C y 90°C ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) de temperatura esto con el fin de obtener el silicato de potasio.
6. Posterior al reflujo, el producto obtenido se filtra al vacío debido a que se quiere separar el carbono y otros componentes del poli silicato de potasio obteniendo una solución altamente alcalina (pH 13-14).

Para este procedimiento la variable de relación de ceniza e hidróxido de potasio se deja constante siendo esta una relación 1:1 en cinco experimentaciones, variando la temperatura y el tiempo de reflujo.

Para realizar el reflujo de la reacción y formar silicato a partir de cenizas a temperatura constante se utilizaron varios materiales y equipo que se pueden encontrar en los cuadros 12 y 13:

Cuadro 13.

Reactivos para la producción de silicatos.

Reactivo	Cantidad
Ceniza de bagazo de caña	100.000 g (± 0.001 g)
Hidróxido de potasio puro	100.000 g (± 0.001 g)
Agua destilada	1500 ml

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 14.

Cristalería y equipos para la producción de silicatos.

Cristalería/equipo	Cantidad
Balón de laboratorio	1 unidad de 500 ml (± 0.250 ml)
Condensador	1 unidad de 50 cm (± 0.05 cm)
Sistema de reflujo (kit de destilación)	1 unidad
Kitasato	1 unidad de 1000 ml (± 0.8 ml)
Filtro Buchner	1 unidad
Mangueras	3 unidades de 5.00cm (± 0.05 cm) de diámetro
Bomba de vacío	1 unidad
Papel filtro	5 unidades de 10.00cm (± 0.05 cm) de diámetro
Potenciómetro	1 unidad
Beakers	3 unidades de 50ml (± 0.2 ml)
Erlenmeyer	1 unidad de 250ml (± 12.5 ml)
Estufa con agitador magnético	1 unidad
Balanza analítica	1 unidad
Probeta	1 unidad de 50ml (± 0.2 ml)

Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar la variable de temperatura se realiza este procedimiento:

1. Pesar en la balanza analítica 10, 15 y 20 gramos (± 0.001 g) de ceniza junto con 10 y 20 gramos (± 0.001 g) de hidróxido.
2. Con una probeta depositar 180 ml de agua destilada al balón de 500ml (± 0.250 ml).
3. Agregar la ceniza, el hidróxido de potasio y agitador magnético al balón de 500ml (± 0.250 ml).
4. Armar el kit de destilación con las respectivas piezas, el balón unido al condensador y termómetro para control de la temperatura, todo esto arriba de una estufa con agitación.
5. Se coloca en reflujo los reactivos utilizados durante 90, 165 y 240 minutos a 85°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) de temperatura esto con el fin de obtener el silicato de potasio.
6. Posterior al reflujo, el producto obtenido se filtra al vacío debido a que se quiere separar el carbono y otros componentes del poli silicato de potasio obteniendo una solución altamente alcalina (pH 13-14).

En este caso la temperatura trabajada es de 85°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), realizando variaciones en la relación de ceniza e hidróxido de potasio, además de variar el tiempo de reflujo, esto se realizó en cinco experimentaciones.

Luego de obtener todos los resultados de rendimiento de reacción se utiliza una herramienta estadística que es utilizada para investigar y observar la interacción o relación

de las variables en el proceso es la metodología de superficie de respuesta, esta consiste que entre las variables explicativas se encuentre la variable de respuesta y la relación entre ellas.

Se determinan resultados por medio de gráficas de diferentes escenarios en la experimentación para observar cuál de las variables tiene un mayor efecto en el rendimiento de la obtención del silicato de potasio. Para finalmente determinar las condiciones de operación adecuadas para obtener un rendimiento alto de reacción en el proceso.

Encontrar las mejores condiciones de operación se enfoca en la reacción de reflujo para producir el silicato de potasio, por lo que se realiza el reflujo y la filtración para determinar la cantidad de silicato obtenido dentro de las muestras. Esto con el fin de encontrar los parámetros adecuados para obtener la maximización de producción de silicato a partir de la materia prima y recursos utilizados. Esta maximización se realizó mediante ecuaciones matemáticas obteniendo resultados en forma gráfica y numéricos.

D. Determinación de silicatos de potasio

El contenido de silicatos de potasio se determina por medio de espectrofotometría UV/VIS. Primero, se realiza una curva de calibración con una solución de silicato de potasio que es utilizada como blanco. En donde relaciona la absorbancia con la concentración de silicato, luego de hacer la curva se configuran las lecturas del espectrofotómetro a una longitud de onda a 410nm y se hacen las mediciones de absorbancia en triplicado por cada muestra esto con el fin de tener un resultado más exacto y estadísticamente significativo. Ya con las absorbancias obtenidas es posible relacionarla con la concentración de sílice en la muestra mediante la curva de calibración.

1. Método del molibdosilicato para análisis de silicatos.

Cuadro 15.

Reactivos para el método de cuantificación de sílice.

Reactivo	Cantidad
Molibdato de amonio puro	15.000 g (± 0.001 g)
Ácido oxálico al 99%	10.000 g (± 0.001 g)
Metasilicato de sodio puro	8.000 g (± 0.001 g)
Bicarbonato de sodio puro	15.000 g (± 0.001 g)
Ácido clorhídrico al 29.5%	10 mL
Agua destilada	2000 mL

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 16.

Cristalería y equipo para el método de cuantificación de sílice.

Cristalería/equipo	Cantidad
Balones aforados	6 unidades de 50 mL (± 0.025 ml)
Balón aforado	1 unidad de 1000mL
Balones aforados	3 unidades de 100 mL (± 0.05 ml)
Potenciómetro	1 unidad
Balanza analítica	1 unidad
Espectrofotómetro UV/VIS	1 unidad
Estufa con agitador magnético	1 unidad
Espátula analítica	1 unidad
Varilla de vidrio	1 unidad
Piseta de agua destilada	1 unidad
Beakers	4 unidades de 250 mL (± 12.5 ml)
Probetas	2 unidades de 50 mL (± 0.2 ml)
Beakers	3 unidades de 100 mL (± 10 ml)
Guantes	1 par
Erlenmeyer	1 unidad de 250 mL (± 12.5 ml)

Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento

1. Disolver 10.000 gramos (± 0.001 g) de molibdato de amonio hepta-hidratado en 100 mL de agua destilada con agitación y calentamiento.
2. Ajustar la solución de molibdato de amonio a pH 7-8 si es necesario, con hidróxido de sodio exentos de sílice.
3. Disolver 7.50 gramos (± 0.001 g) de ácido oxálico en 100 mL de agua destilada en balón aforado.
4. Disolver 4.73 gramos (± 0.001 g) de metasilicato de sodio en 1000 mL de agua destilada en balón aforado que se utiliza para la curva de calibración.
5. Preparar soluciones patrón de sílice diluyendo 10 mL de solución madre de metasilicato de sodio en 1000 mL de agua (1mL = 10 μ g SiO₂)
6. Añadir a 50.0 mL (± 0.2 ml) de muestra en un beaker de 250 mL.
7. Añadir 1.0 mL (± 0.2 ml) de HCl 1M al beaker de 250 mL.
8. Añadir 2.0 mL (± 0.2 ml) de solución de molibdato al beaker de 250 mL y mezclar los reactivos.
9. Dejar reposar durante 5-10 minutos.
10. Añadir 2.0 mL (± 0.2 ml) de solución de ácido oxálico y mezclar, dejando reposar durante 2 minutos esperar a que se torne un color amarillento fuerte.
11. Medir por medio de fotometría la absorbancia a una longitud de onda a 410 nm. No puede realizarse después de 15 minutos.
12. Realizar curva de calibración y hacer lecturas de las muestras de silicato.

13. Determinar concentración en ppm de las muestras refluadas, con base a lo obtenido en las lecturas.

En resumen, la espectrofotometría para un silicato de potasio se basa en la medición de la absorción de luz a cierta longitud de onda específica. Al utilizar una curva de calibración de soluciones estándar de silicato de potasio, se puede obtener la concentración de silicato de potasio presente en la muestra desconocida a partir de la absorbancia medida.

VII. Resultados

A. Caracterización de la ceniza de bagazo de caña

Cuadro 17.

Propiedades fisicoquímicas del material.

Propiedades	Característica
Peso molecular de muestra de ceniza	64.35 g/mol
Naturaleza	Sólido amorfo
Color	Gris oscuro
Textura	Polvo fino, suave
Olor	Inodoro
Tamaño de partícula	1-10 um

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 18.

Composición química de ceniza de bagazo de caña (% m/m).

Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	TiO ₂	LOI	Total
5.62	6.35	0.02	3.02	7.77	3.73	0.08	1.07	2.77	0.11	54.12	0.25	14.88	99.79

Fuente: Elaboración propia.

Información obtenida de estudio de rayos X por fluorescencia por parte de Cementos Progreso. Estos son composiciones en porcentaje.

Cuadro 19.

Humedad contenida en la ceniza

Muestra	Humedad (± 0.002 m/m)
1	2.52%
2	2.31%
3	1.79%
Promedio	2.21%

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 20.

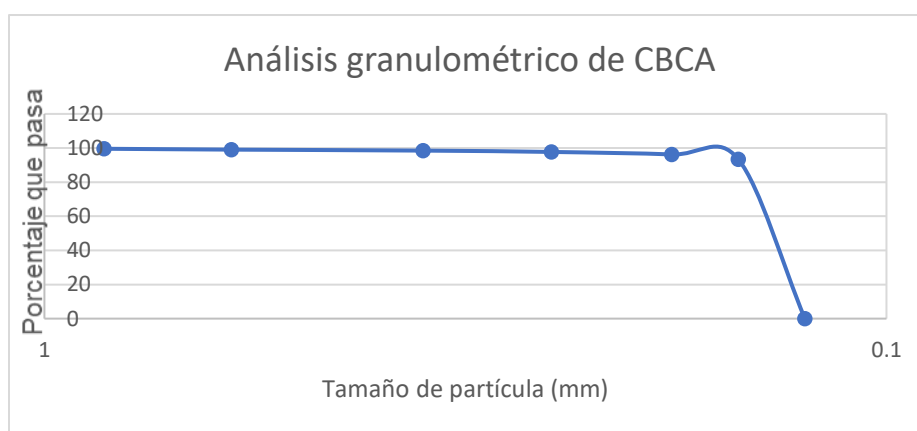
Determinación de densidad aparente (de bulto) de la ceniza de bagazo de caña

Propiedad	Valor obtenido ($\pm 0.005 \text{ g/cm}^3$)
Densidad obtenida	2.249
Densidad teórica	2.330

Fuente: Elaboración propia.

Figura 27

Análisis granulométrico de ceniza de bagazo de caña.



Fuente: Elaboración propia.

Para que el análisis granulométrico proporcione más información se tiene que determinar unos rangos de menor tamaño para obtener más detalle del tamaño de partícula, se determinó que el tamaño de partícula a 0.125um favorece la reacción obteniendo resultados con mejores rendimientos. Además, se recomiendan que el mesh y la escala sea de menor tamaño para determinar un tamaño adecuado para esta materia prima, siendo la ceniza de bagazo de caña de azúcar.

B. Producción de sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña

La metodología propuesta para la producción de sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña está detallada en la sección VI. Que corresponde al apartado de metodología en el inciso B. En esta se tienen todos pasos a seguir para realizar este proceso junto con la explicación de los reactivos, equipos y parámetros utilizados en este proyecto. Esta metodología se realizó en base a experimentación realizada en el laboratorio y literatura citada investigada para la producción de sílice precipitada a través de diferentes antecedentes y artículos científicos. Dentro de la literatura se encontraron varias metodologías para llegar

al mismo producto, sin embargo, son otro tipo de materias primas como cáscara de arroz, componentes químicos, entre otros. Se buscó explicar el proceso y los parámetros de operación adecuados para la producción de esta. Con ello se pudo obtener el producto deseado con las propiedades analizadas para respaldar la composición de la sílice producida. Finalmente, se llegó a esta metodología en conjunto de varias corridas con sus respectivos resultados para discutir el proceso que se llevó a cabo en las diferentes fases para llegar al producto terminado deseado.

Cuadro 21.

Proporciones y producción de corridas para obtención de sílice precipitada.

No	Cantidad de ceniza (± 0.001 g)	Cantidad de SiO ₂ en muestra (± 0.001 g)	Cantidad de hidróxido (± 0.001 g)	Relación (ceniza/hidróxido)	Sílice obtenida (± 0.001 g)	Rendimiento (%)
1	20.000	5.056	15.000	1:0.75	3.075	60.82
2	20.000	5.056	20.000	1:1	4.187	82.81
3	15.000	3.794	20.000	0.75:1	2.001	52.74
4	10.000	2.529	20.000	1:2	1.643	64.97

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 22.

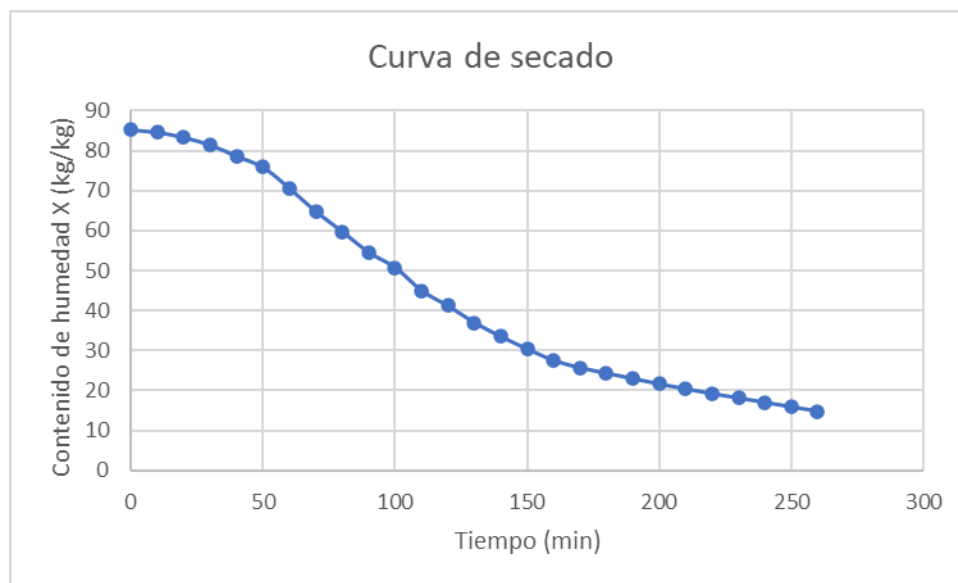
Rendimiento respecto a tiempos de reacción con reflujo.

Corrida	Tiempo de reflujo (min)	Relación (ceniza/hidróxido)	Temperatura ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)	Rendimiento (%)
1	360	1:0.75	80.0°C	60.82
2	100	1:1	80.0°C	82.81
3	90	0.75:1	85.0°C	52.74
4	95	1:2	80.0°C	64.97

Fuente: Elaboración propia.

Figura 28.

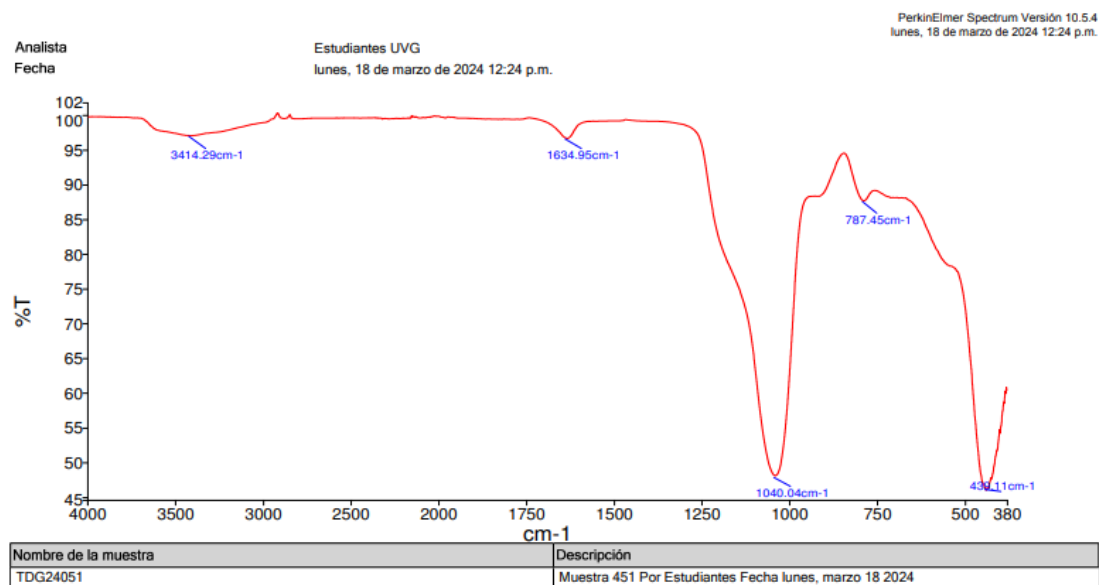
Curva de secado de sílice obtenida después de precipitación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29.

Espectroscopia FTIR para la sílice comercial.

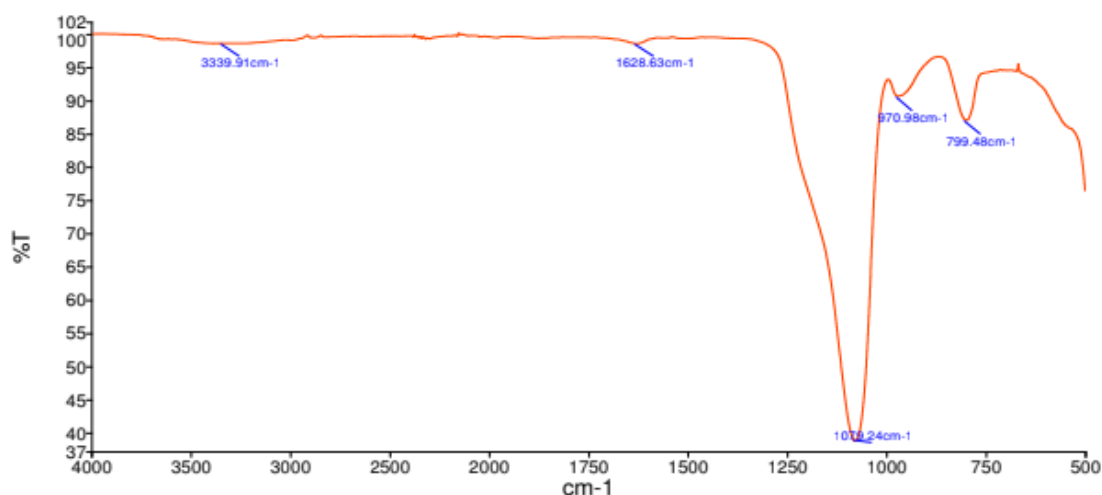


El %T representa el porcentaje de transmitancia que pasó en la muestra por el espectro de IR.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 30.

Espectroscopia FTIR para la sílice obtenida.



El %T representa el porcentaje de transmitancia que pasó en la muestra por el espectro de IR.

Fuente: Elaboración propia.

C. Análisis estadístico de los resultados experimentales

Cuadro 23.

Diseños de superficie de respuesta disponibles por número de factores continuos y número de datos de muestra

Diseño		Factores continuos								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Compuesto central 100%	Desbloqueado	13	20	31	52	90	152			
	Bloqueado	14	20	39	54	90	160			
Compuesto central 50%	Desbloqueado				32	53	88	154		
	Bloqueado				33	54	90	160		
Compuesto central 25%	Desbloqueado							90	156	
	Bloqueado							90	160	
Compuesto central octavo	Desbloqueado									158
	Bloqueado									160
Box Behnken	Desbloqueado		15	27	46	54	62		130	170
	Bloqueado			27	46	54	62		130	170

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 24.

Caja de Behnken de variables independientes.

Variables	Unidad	Nomenclatura	Niveles		
			-1	0	1
Relación ceniza/hidróxido	g/g	A	0.5	1	1.5
Tiempo	Min	B	90	165	240
Temperatura	°C	C	80	85	90

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 25.

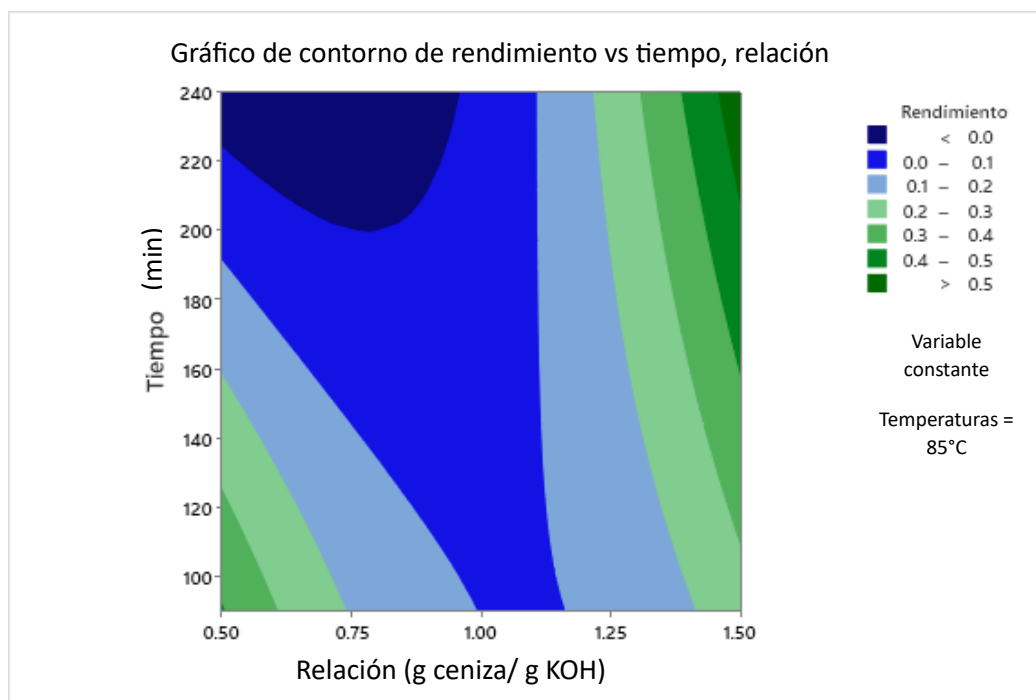
Variables de Behnken de variables dependientes.

Variables	Unidad	Nomenclatura	Niveles		
			-1	0	1
Rendimiento Sílice	(%) g/g	D	40%	50%	60%

Fuente: Elaboración propia.

Figura 31.

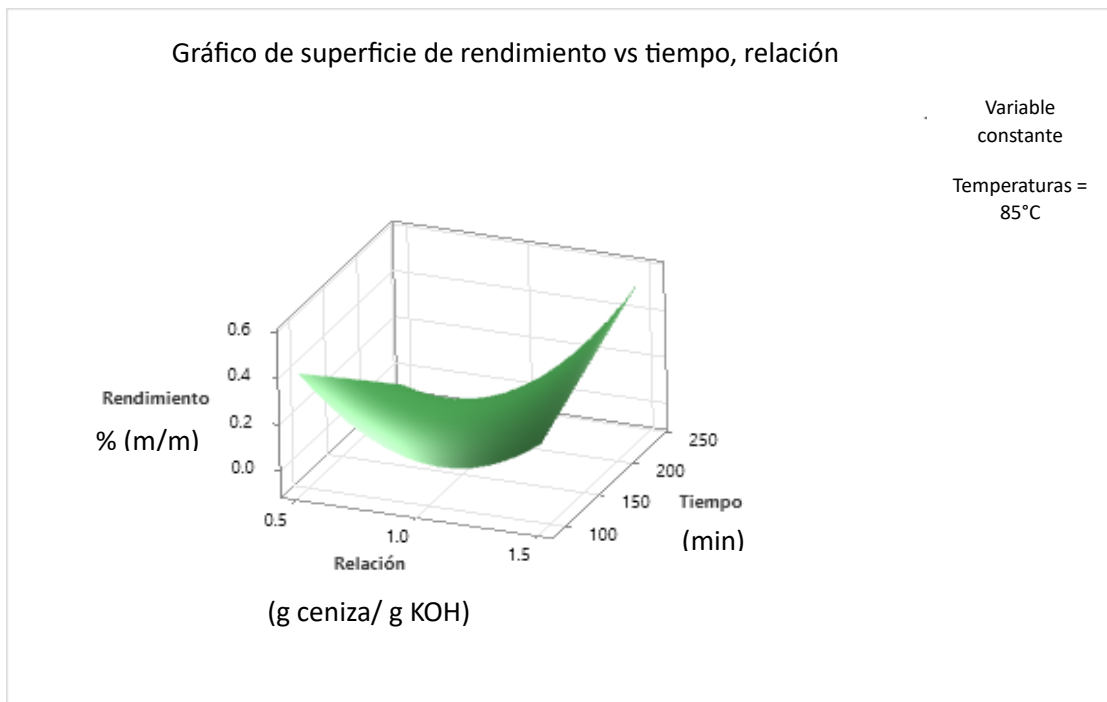
Gráfico de contorno de rendimiento vs tiempo, relación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32.

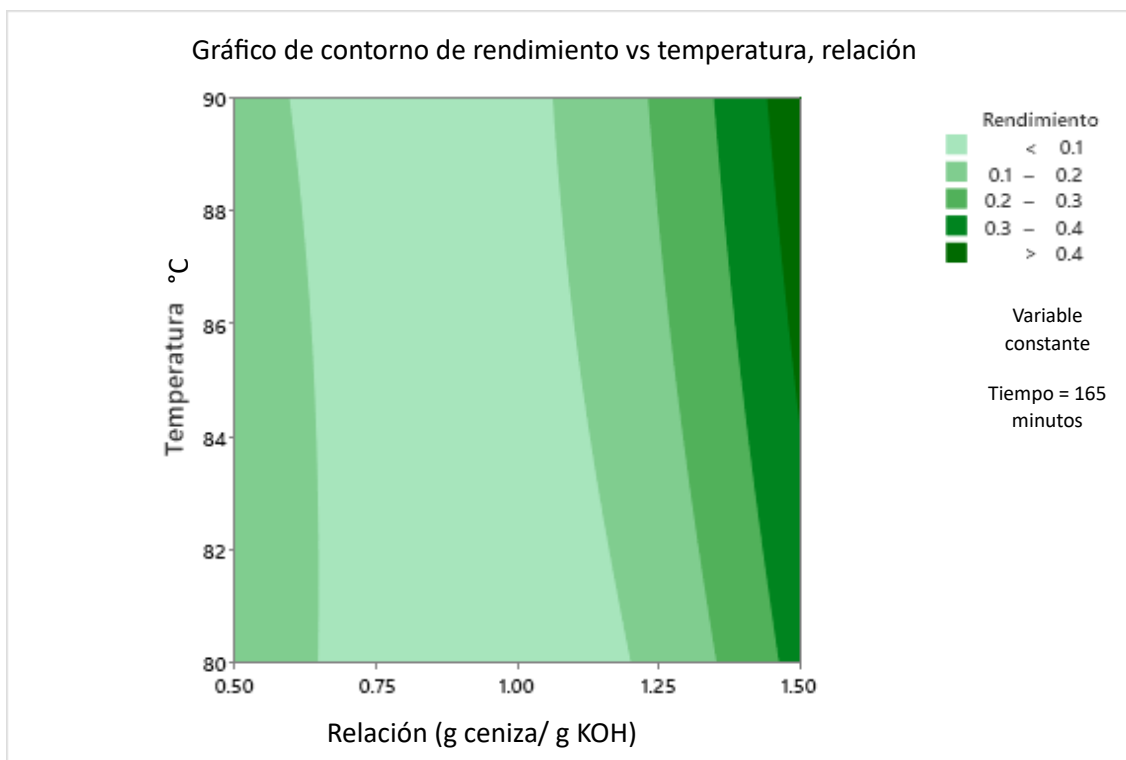
Gráfico de superficie de respuesta rendimiento vs tiempo, relación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 33.

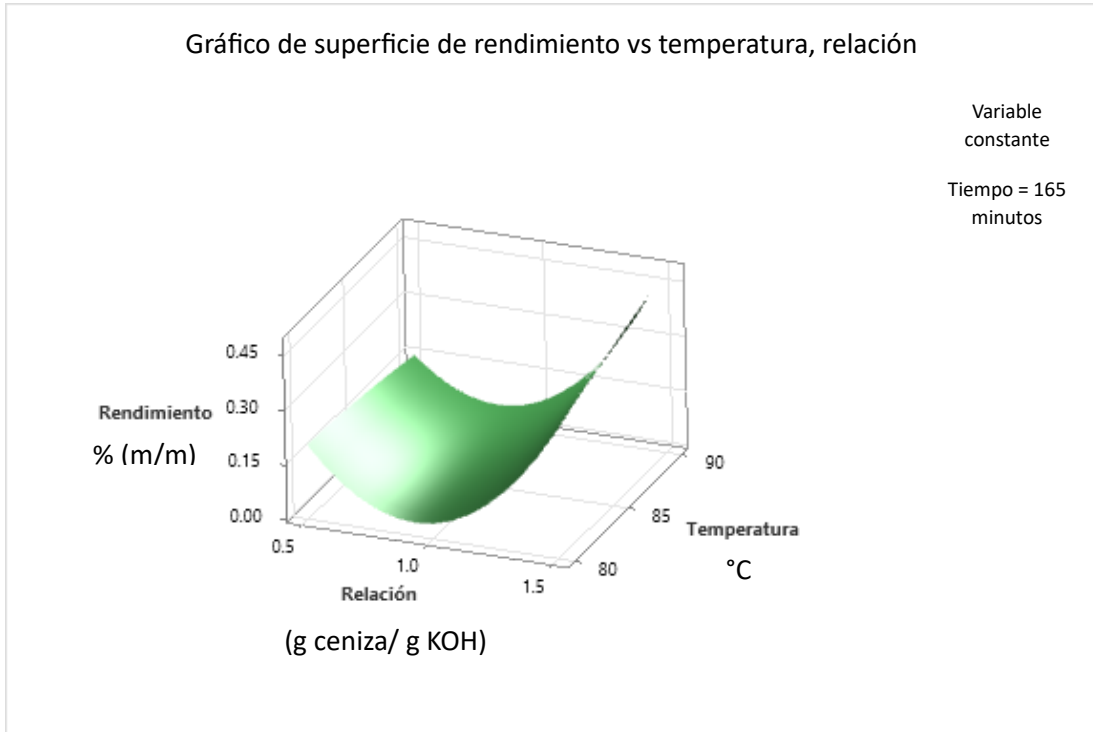
Gráfico de contorno de rendimiento vs temperatura, relación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 34.

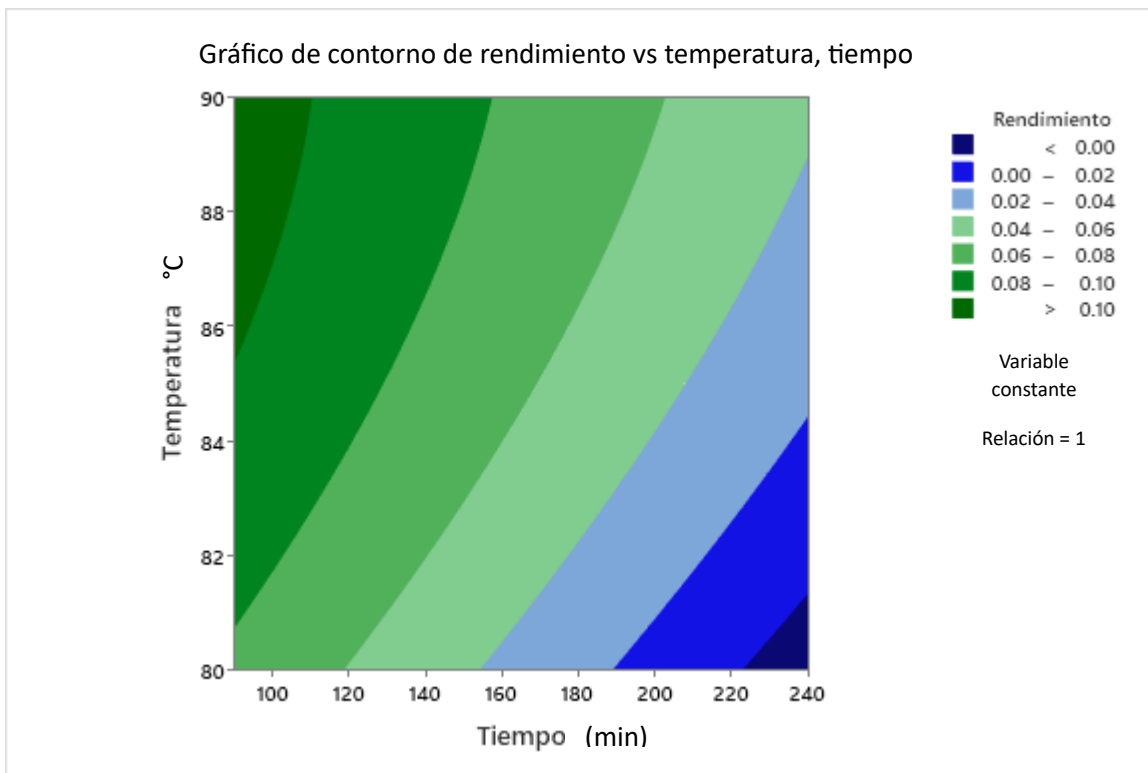
Gráfico de superficie de respuesta rendimiento vs temperatura, relación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35.

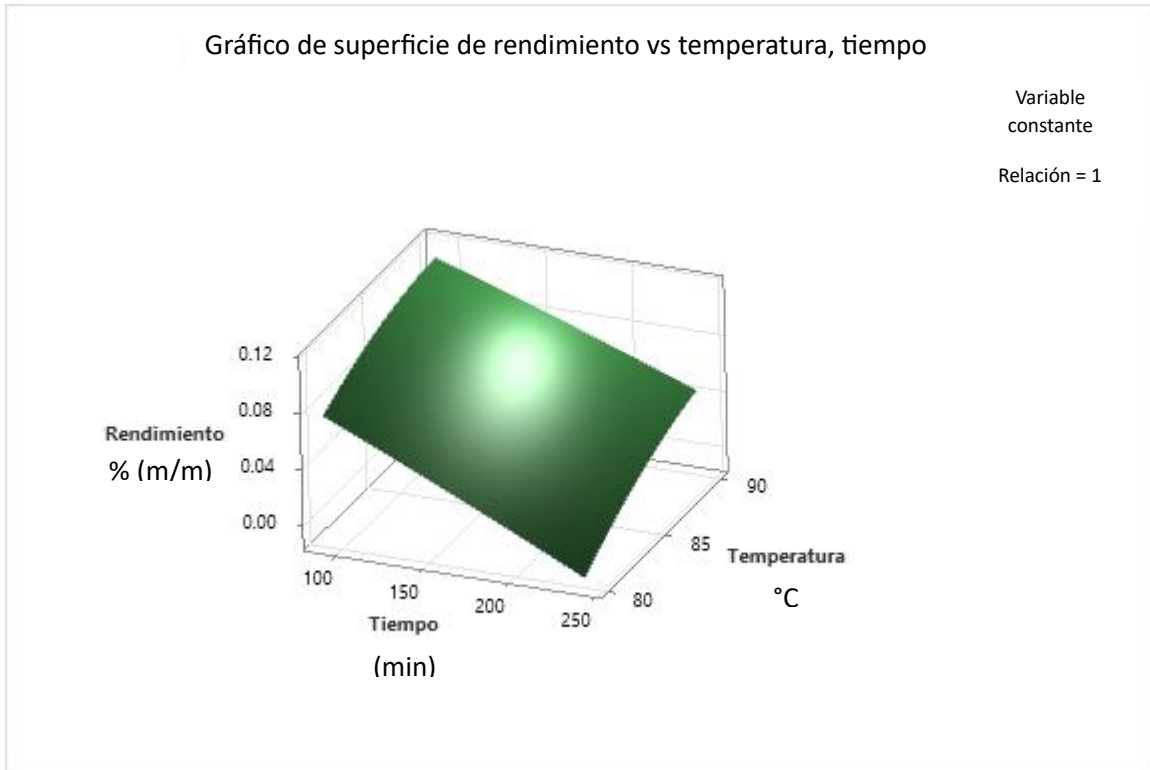
Gráfico de contorno de rendimiento vs temperatura, tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 36.

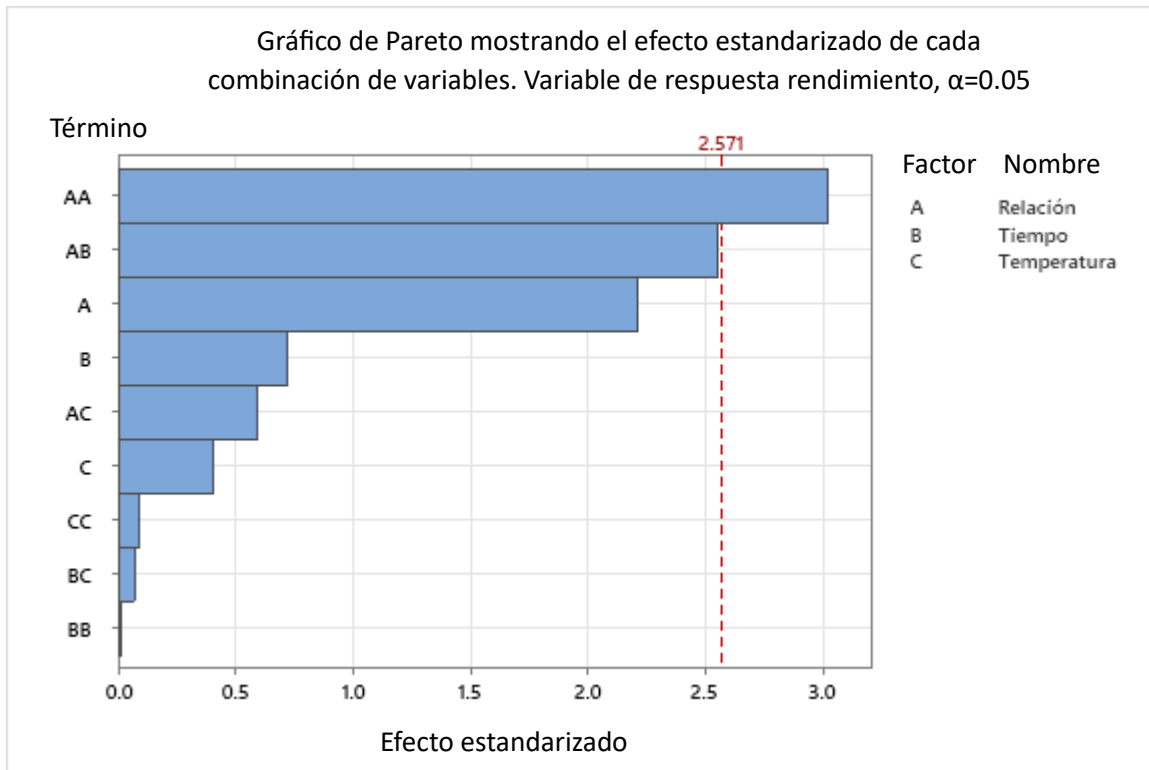
Gráfico de superficie de respuesta rendimiento vs temperatura, tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 37.

Diagrama de Pareto del efecto estandarizado.



Fuente: Elaboración propia.

VIII. Discusión de resultados

Con el propósito de producir sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña, inicialmente se realizó una caracterización de la materia prima, que en este caso es la ceniza de bagazo de caña, ya que es de vital importancia conocer las propiedades fisicoquímicas para su manejo adecuado de la sílice, también conocer su composición es un prueba para definir la forma en que se puede utilizar esta materia prima para producir sílice, determinando si es apta para el proceso y estandarizar la repetibilidad del método. Con la diversidad de materias primas que tienen altas concentraciones de sílice puede haber diferentes rendimientos. Se propuso una metodología con todos los parámetros y condiciones para llegar al producto deseado. Logrando obtener las mejores condiciones para el proceso que permite obtener el mayor rendimiento posible en la experimentación del trabajo.

Se utilizó la fluorescencia de rayos X para determinar los componentes que tiene la materia prima, debido a que se necesita un método cuantitativo para obtener el valor exacto del contenido de cada componente en la ceniza, esto es de vital importancia para determinar los rendimientos del proceso. En el cuadro 18, se puede observar el resultado de la fluorescencia de rayos X que la ceniza contiene un 54.12% de óxido de silicio, el componente de interés para la producción de este producto ya que normalmente el silicio existe como óxido. Esta prueba confirma que la mayor parte de la ceniza de bagazo de caña es óxido de silicio y por lo tanto es una buena materia prima para la producción de sílice.

Además, se observaron factores físicos como el color o el olor, respecto al primer factor mencionado, tener una materia prima de color oscuro quiere decir que todavía tiene carbono disponible debido a que no se quemó del todo, por lo que es un indicador de presencia de componentes volátiles. Este factor es importante debido que las propiedades y la ausencia de componentes como carbono o aluminio indican una mayor proporción de sílice en la muestra, teniendo un impacto directo en la obtención del silicato, ya que al tener una ceniza con una combustión completa cuenta con mayor cantidad de óxido de silicio.

En la figura 27, se puede observar que como parte de la caracterización se hizo un análisis de tamaño de partícula por medio del análisis granulométrico. Se puede afirmar que el 93.47% de la ceniza analizada tiene un tamaño de partícula menor a 0.125mm, esto quiere decir que es una partícula de tamaño pequeño, favoreciendo la reacción debido a que la ceniza en conjunto representa un área de contacto mayor, por lo que al ponerlo en contacto con el hidróxido de potasio la reacción se llevó a cabo de la mejor manera en términos de área de contacto. Esto se fundamenta mediante el análisis de tamaño de partícula en una reacción, el tamaño grande significa que hay menor área de contacto y cuesta más llevar a cabo una reacción. un tamaño pequeño hace que las reacciones sean más eficientes y pueda tener mejores rendimientos, esto debido a la esfericidad, poca segregación y uniformidad del tamaño de partícula.

La humedad fue medida debido a que la ceniza es higroscópica por lo que absorbe humedad en el tiempo ya que esta entra en equilibrio con la humedad del ambiente que lo rodea, variando su contenido. El contenido de agua que hay en la ceniza afecta directamente a la pureza de la muestra, debido a que en agua de la muestra provoca que la proporción de sílice disminuya. Por lo que la humedad se busca reducir la humedad para aumentar la pureza y el porcentaje contenido de sílice sea mayor. Además, durante el secado de la muestra se necesita remover mayor cantidad humedad esto representa más tiempo de operación del horno secador lo que incide en mayores costos de consumo de energía a temperaturas mucho más altas que la ambiental.

Por medio de diferencias de pesos se determinó una humedad de 2.21% en promedio. Siendo una cantidad representativa, por lo que se recomienda que al operar con la ceniza de bagazo de caña se utilice en el menor tiempo posible para evitar las altas cantidades de humedad en la materia prima. La ceniza de bagazo de caña al salir de los hornos del ingenio cuenta con un aproximado de 1%. La densidad obtenida de la muestra de ceniza determinada fue de 2.249 g/cm³, mientras que el valor teórico es de 2.330 g/cm³.

Una vez caracterizada la materia prima y verificar que es la ceniza de bagazo de caña es una fuente rica de sílice, se procede con la extracción del silicato para poder proponer una metodología. La extracción consta de estos pasos: El reflujo, la filtración al vacío, acidificación, filtración al vacío y secado final. Inicialmente, se realizó el reflujo que consiste en colocar la ceniza, el hidróxido de potasio y agua en conjunto. Se pudo obtener la sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña de azúcar por el método propuesto en el trabajo. Para la extracción se utilizó filtración al vacío porque los silicatos son solubles en agua, permitiendo la separación del silicato y los otros componentes que se obtienen como subproductos que tienen diversos usos en otros procesos industriales.

Se realizó una metodología para la producción de sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña, en el cual se determinaron las proporciones de reactivos adecuados, así manteniendo una relación mayor de ceniza que de hidróxido de potasio, en esta experimentación se propone una relación 1.5 debido a que es con la que se obtuvo mayor rendimiento, ya que la sílice disponible es mayor. Cabe destacar que en todo el proceso y en el reflujo se utilizan 200mL de agua destilada, debido a que la sílice es soluble en agua, mientras que los otros componentes no son solubles en agua, por lo que al momento de filtrar al vacío se separan las fases por medio diferencia de solubilidades. De la solución obtenida de silicato esta se acidifica, ya que a pH entre 5-8 comienza a precipitar formando un sólido en forma de óxido de silicio húmeda por lo que es necesario remover el agua contenida del producto obtenido, por ello se utiliza un horno secador para acelerar el proceso de la remoción de humedad.

Se eligió este método de producción de sílice debido a que los subproductos obtenidos posterior a las filtraciones pueden ser utilizados para otros procesos, estos pueden ser materias primas, productos intermedios o terminados, promoviendo la economía circular. Por ejemplo, el carbono y otros componentes obtenidos de la primera filtración puede ser utilizada para hacer mascarillas de carbón activado o producción de grafito.

Otro de los subproductos obtenido de la filtración del silicato es la solución de cloruro de potasio al separarse de la sílice precipitada, que comúnmente se utiliza como fertilizante para plantas. Por ello, la principal razón de utilizar el hidróxido de potasio en lugar de hidróxido de sodio, ya que el cloruro de potasio obtenido de la filtración tiene un uso con beneficios ambientales que permite utilizarse en la agroindustria u otros campos de las plantas.

Ya con la metodología realizada y aprobada, en donde se entendió el proceso de producción con mayor claridad, se llegaron a realizar diversas experimentaciones para la obtención de sílice precipitada. En estas se definieron las variables que pueden afectar al proceso de producción completo obteniendo diferentes rendimientos. Como se observa en el cuadro 21 y 22, se obtuvo rendimientos en un rango aproximadamente de 30% a 48%, por lo que se puede afirmar que es importante tomar en cuenta las cantidades utilizadas de cada reactivo, ya que si cuentan con una variación estadísticamente representativa. La que obtuvo mayor rendimiento con un 47.98% de rendimiento, contó con una relación 1:1 de ceniza e hidróxido y 100 minutos de reflujo, cabe destacar que esto también depende de la forma en que se llevaron a cabo las operaciones unitarias como la filtración al vacío y el secado de la sílice.

Todas las experimentaciones se manejaron con la misma cantidad de agua destilada, siendo esta de 200mL, por ello se realizó una curva de secado y mostrar la tendencia característica de secado en la muestra, se necesitaron 260 minutos para remover la humedad contenida en la muestra, ya que la sílice tiene agua contenida y requiere de temperaturas por arriba de los 200°C. En la figura 26 se observa la curva característica que muestra la remoción de humedad respecto del tiempo, en donde esta carece de una etapa de velocidad de secado constante, ya que la remoción de humedad es proporcional a la cantidad de agua contenida en la muestra. La sílice con una humedad pequeña que es menor al 20%, disminuye la velocidad de secado, esto puede comprobarse en los últimos puntos tomados de la curva.

Para comprobar la presencia de sílice en el producto terminado a partir de las experimentaciones se realizó una lectura de espectroscopía FTIR, esto debido a que es un método cualitativo que puede proporcionar la presencia de los diferentes compuestos con el fin de confirmar que el contenido de sílice sea el mayor, dando las propiedades deseadas del producto. Se realizó una comparación de espectros entre sílice comercial y la sílice experimental para observar las similitudes y variaciones en los picos de los compuestos químicos presentes.

Luego de comprobar y obtener producto terminado, se buscó determinar las variables y parámetros más importantes para obtener el mayor rendimiento posible y así proponer, por medio de un análisis estadístico las condiciones de operación adecuadas para obtener la mayor cantidad de sílice en el proceso. Para llevar a cabo el análisis se utilizó el método de superficie de respuesta ya que permite observar como las variables independientes que son temperatura, tiempo y relación ceniza/hidróxido, afectan a la variable de respuesta que es el rendimiento. El diseño de Box-Behnken fue una herramienta muy útil debido a que ayudó a determinar las mejores condiciones del reflujo de la ceniza con 15 factores de las diferentes

variables esto determinado por la ecuación 2, definiendo puntos de diseño con una serie de combinaciones de niveles altos, bajos y medios como se puede observar en el cuadro 24 y 25. Este diseño no muestra la combinación extrema de todos los factores, esto quiere decir que no se colocó la mayor relación, tiempo y temperatura en una corrida esto debido a que se establecieron límites en la experimentación y a cierto punto, pero se compensa con una mejor predicción de los parámetros adecuados para la producción del silicato.

Se obtuvo rendimientos con diferentes condiciones de operación en donde se variaron las variables independientes. Esto se representó gráficamente tanto con una gráfica de contorno como la de superficie de respuesta ya que permite visualizar el impacto de estas variables. Las concentraciones fueron determinadas por medio de espectrofotometría UV/VIS ya que las absorbancias obtenidas de la muestra son proporcionales a la concentración en ppm, por lo que permitió determinar los rendimientos mediante el peso de silicato en el producto deseado.

Como se puede observar en la figura 31 se comparan las variables de tiempo y relación a una temperatura constante en donde el rendimiento es mayor cuando se obtienen relaciones aproximadamente de 1.50, mientras que al tener relaciones menores de 1 y con tiempos altos los rendimientos son debajo del 0.1. Por lo que se puede concluir que la relación de ceniza/hidróxido es proporcional al rendimiento de silicato obtenido, mientras que el tiempo de reacción es una variable que tiene un impacto poco significativo en el rendimiento, por ello se puede concluir que el tiempo suficiente para llevar a cabo el reflujado es de 90 minutos. En el cuadro 28 se refleja que los dos puntos más altos están con una relación de 1.5, esto puede ser debido a que, al depositar mayor cantidad de ceniza, existen una mayor cantidad de sílice en la muestra reaccionando con el hidróxido.

En la determinación de los mejores parámetros de la reacción también se hizo el análisis para la relación de ceniza/KOH y temperatura con el tiempo constante, esto con el fin de determinar la importancia de estas variables independientes, y observar el impacto que tienen. En la figura 33, se muestra que la zona con mayor rendimiento es donde se tiene una relación y temperatura alta, ya que la reacción necesita de condiciones altas de operación para obtener un mayor rendimiento, especialmente una mayor relación de ceniza e hidróxido. Además, es importante mencionar que sin importar el valor que tengan estas variables los rendimientos de reacción son más altos que en otras condiciones debido a que el tiempo de reacción que fue de 165 minutos, se considera adecuado para la reacción, debido a que se afirma que si se tiene un tiempo mayor puede afectar el rendimiento de reacción de manera negativa, ya que el hidróxido ya no reacciona con la sílice contenida en la ceniza.

Esto demuestra que a grandes relaciones el incremento del tiempo tiene un mínimo efecto en la extracción de la sílice de la ceniza. Mientras que, con relaciones de ceniza e hidróxido grandes, las altas temperaturas causan un incremento en la producción de silicato en la reacción. Como se observa en la figura 33, a un tiempo de 165 minutos, la relación de ceniza/KOH mayor a 1.25 y temperatura mayor o igual 85°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), se obtienen rendimientos mayores a 0.4 siendo los rendimientos más altos.

Finalmente se analizaron las variables de temperatura y rendimiento con la relación de reactivos fija con una cantidad de 1. En la Figura 35 se puede observar que la tendencia muestra que entre mayor tiempo de reflujo se tenga, menor será el rendimiento, incluso en los tiempos por arriba de los 200 minutos los rendimientos están por debajo del 0.02, quiere decir que el tiempo es inversamente proporcional al rendimiento, sin embargo, tiene que estar con un mínimo de 90 minutos para que pueda llevarse a cabo la reacción. Mientras que la temperatura es proporcional y es importante que se mantenga en el rango de temperatura alto para que la formación de silicato se realice de la manera más eficiente.

Es importante mencionar que la obtención de las muestras de ceniza provenientes del ingenio se obtuvo a partir de un muestreo simple; esto quiere decir que las muestras fueron tomadas en puntos del ingenio que era cómodos para ellos ya que no se tuvo la oportunidad de ir presencialmente al ingenio a tomar las muestras. En la caracterización de las muestras de ceniza de bagazo de caña de azúcar, se realizó un muestreo básico para evitar contaminantes, sin embargo, no se realizó en varios puntos ya que la ceniza obtenida para la experimentación fue obtenida de un solo punto del ingenio, además el muestreo no se hizo en diferentes tiempos durante la zafra, que cuentan con diferentes condiciones climáticas y ambientales. Por lo que se recomienda hacer un muestreo detallado de la ceniza de bagazo de caña de azúcar, en donde se tome muestra en diferentes puntos del proceso, Esto con el fin de obtener resultados más exactos en la caracterización de la ceniza que es proveniente de los ingenios y observar distintas condiciones de operación y de proceso. Como se indica en los anexos sección F, se muestra un procedimiento detallado de cómo se recomienda hacer el muestreo de forma que se pueda obtener los mejores resultados en la caracterización de la ceniza y pueda ser replicativo.

Se puede llegar a concluir que la relación de ceniza/KOH es la variable independiente con mayor impacto en el rendimiento en la obtención de silicato, luego el tiempo y la temperatura tiene un impacto menor. Esto debido a que entre más concentrado esté el reactivo de interés mayor será su velocidad de reacción y cantidad de producto obtenido de la misma. Por lo que se obtendrá mayor cantidad de sílice obtenida al final del proceso. Los parámetros de operación son de vital importancia para el rendimiento de la reacción, según el modelo de superficie relacionada los parámetros obtener el mayor rendimiento de reacción son una relación de ceniza/KOH con un valor de 1.5, tiempo de 165 minutos y 90°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) de temperatura. Esto demuestra que las condiciones utilizadas son las medias y superiores del modelo por lo que es importante trabajar con relaciones y temperaturas altas, mientras que el tiempo de reacción es un valor mediano para ejecutar de mejor manera la producción.

Un factor que pudo haber afectado en las mediciones de concentración de silicato en la muestra fue el tiempo de almacenado de las muestras, ya que debido a la larga duración de las reacciones se dificultaba tomar la muestra al instante, esto causando un error sistemático. debido a que cada muestra se hizo en diferente fecha de producción, al hacer el muestreo las muestras contaban con diferentes tiempos de haberse producido, por lo que la solución alcalina pudo tener alteraciones en sus propiedades y composición de esta, teniendo una ligera variación de la medición.

IX. Conclusiones

Se realizó una caracterización de la ceniza de bagazo de caña con el fin de determinar las propiedades fisicoquímicas del compuesto con el tamaño de partícula en promedio menor a 150 μ m , humedad de 2.21% y densidad obtenida de 2.249 g/cm³, que son los rangos adecuados para llevar a cabo la operación, principalmente determinando que el contenido de óxido de silicio es de 54.12%, demostrando ser una muy buena fuente de sílice y puede ser utilizada como materia prima para la producción de sílice precipitada en el proceso.

Se logró desarrollar una metodología para producir sílice precipitada con las mejores condiciones de operación y maximizar su producción, obteniendo 4.187 (± 0.257 g) gramos de sílice con un rendimiento del 82.81%. Estos resultados reflejan la eficiencia y eficacia del proceso implementado, lo que representa un avance significativo en la producción de sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña.

Por medio de un análisis cuantitativo de proceso mediante el método de superficie de respuesta con un diseño de Box-Benhken se determinaron los parámetros de las variables independientes más adecuados para la producción de sílice precipitada proporcionando el mayor rendimiento, con una relación de 1.5 de ceniza/KOH, un tiempo de reacción 165 minutos y 85°C ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). Con estos parámetros de operación se obtuvo un 60.29% de rendimiento de sílice obtenida de la muestra.

X. Recomendaciones

Se recomienda realizar una escala piloto para desarrollar un proceso estandarizado de producción de sílice precipitada a partir de bagazo de caña y pueda tener mayor impacto para la reutilización de este residuo y aportar tanto en el ámbito ambiental como en lo social.

Dando seguimiento en el proceso, se recomienda realizar una determinación de los mejores parámetros de la acidificación del silicato en donde se miden las variables de pH, volumen de ácido y temperatura, esto por medio de un modelo estadístico que permita determinar los parámetros de operación adecuados y así obtener un mejor rendimiento en el proceso global de la producción de sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña.

Se recomienda realizar el análisis de las muestras de silicato al instante de que sea producido, ya que el tiempo de almacenado afecta en las lecturas y propiedades del producto final.

XI. Bibliografía

ABG, L. (2019) *Solubilidad, efectos del pH y los iones complejos*. Quimigen. Extraído de: <https://www.liceoagb.es/quimigen/solu4.html>

Agilent (2023) *The basics of UV/Vis Spectrophotometry*. Extraído de: <https://www.agilent.com/cs/library/primers/public/primer-uv-vis-basics-5980-1397en-agilent.pdf>

Aguilera, A. (2017) *Compuesto de silicio (organosilanos, silanos)* Extraído de: <https://docplayer.es/45782354-Compuestos-de-silicio-organosilanos-silanos.html>

Andalucía E. (2014) *Usan cenizas de la combustión de biomasa como alternativa al cemento en bloques de construcción*. España. Extraído de: <https://www.europapress.es/andalucia/economia-conocimiento-00672/noticia-jaen-sostenible-usan-cenizas-combustion-biomasa-alternativa-cemento-bloques-construccion-20140505150934.html>

Arbeláez et. Al. (2022) *Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón*. Elsevier. Extraído de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0366317522000462>

Banoth S. (2021) *Sustainable thermochemical extraction of amorphous silica from biowaste*. Extraído de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12633-021-01293-z>

Brooks, D. (2023) *Unit: 3 Response Surface Methodology*. AMU. Extraído de: <https://old.amu.ac.in/emp/studym/5788.pdf>

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2020) *Ceniza procedente de la incineración de biomasa*. España, Madrid. Extraído de: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/23/cenizas-procedentes-de-la-incineracion-de-biomasa/>

Cepal (2020) *Economía circular en América Latina y el Caribe: Oportunidad para una recuperación transformadora*. Naciones Unidas. Extraído de: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47309/1/S2100423_es.pdf

Cengicaña (2016) *Recopilación de la información de los simposios del análisis de zafra*. Guatemala.

Channoy C. (2017) *Preparation and characterization of silica gel from bagasse ash*. Advanced Materials Research Vol 1145.

Chindaprasirt, P., & Rattanasak, U. (2020). *Eco-production of silica from sugarcane bagasse ash for use as a photochromic pigment filler*. Scientific Reports, 10(1). Extraído de: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66885-y>

Chungsawang (2018) *Production of Silica from Biomass Ashes*. College of engineering, Rangsit University. Extraído de: http://www.buuconference.buu.ac.th/tiche2018/reg/getfile.php?name=paper92&file=file/TI_CHE2018/paper92.pdf

Cifuentes, W. (2011) *Sistemas de cogeneración para el ahorro de energía en la industria*. Guatemala, Usac. Extraído de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0171_ME.pdf

Corral, J. (2012) *Caracterización granulométrica de las plantas productoras de área en la República Dominicana, su impacto en la calidad y costo del hormigón*. Ciencia y sociedad. Extraído de: <redalyc.org/pdf/870/87024622003.pdf>

Cruz, P. (2018) *Peso atómico, peso molecular*. Proyecto de innovación docente. Departamento de química analítica, Universidad de Zaragoza. Extraído de: https://ocw.unizar.es/ocw/pluginfile.php/1735/mod_resource/content/9/Tema%20Quimica2_curso0_19.pdf

Della, V.P., Kuhn, I. and Hotza, D. (2002) *Rice Husk Ash as an Alternate Source for Active Silica Production*. Materials Letters, 57, 818-821. Extraído de: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkozje\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2260941](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkozje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2260941)

Editor of Encyclopedia Britannica (2019) *Silicon: Chemical Element*. Extraído de: <https://www.britannica.com/science/silicon>

Editorial Etecé (2020) *¿Qué es el pH?* Enciclopedia concepto. Extraído de: <https://concepto.de/ph/>

Elanthikkal S. (2022) *Extraction of biosilica from date palm biomass ash and its application in photocatalysis*. Arabian Journal of Chemistry. Extraído de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535222008383/pdf?isDTMRedir=true&download=true> (antecedente ya descargado)

Elmer, P. (1996) *Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy*. http://www1.lasalle.edu/~prushan/Instrumental%20Analysis_files/AA-Perkin%20Elmer%20guide%20to%20all!.pdf (pag 236)

Fardhyanti, D. et. Al. (2018) *Synthesis of silica powder from sugar cane bagasse ash and its application as adsorbent in adsorptive-distillation of Ethanol-water solution*. Department of chemical engineering, Universitas Negeri Semarang, Indonesia. Extraído de: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/96/mateconf_d2me2018_02002.pdf

Fernandez, S. (2021) *Sistemas coloidales*. Capítulo 2. Ciudad de México. Extraído de: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/5510/Capitulo2.pdf>

Fisher, T. (2023) *Atomic absorption Spectrometry Information*. Thermo Scientific. Extraído de: <https://www.thermofisher.com/gt/en/home/industrial/spectroscopy-elemental->

[isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/trace-elemental-analysis-tea-information/atomic-absorption-information.html#:~:text=Atomic%20absorption%20spectrometry%20\(AAS\)%20detects,absorbances%20are%20measured%20against%20standards.](http://isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/trace-elemental-analysis-tea-information/atomic-absorption-information.html#:~:text=Atomic%20absorption%20spectrometry%20(AAS)%20detects,absorbances%20are%20measured%20against%20standards.)

García U. (2018) *Temperatura y humedad*. Uruguay. Extraído de: http://www.meteorologia.edu.uy/wp-content/uploads/2019/Taller_intro_ciencias_de_la_atm/TemperaturaYhumedad.pdf

Glassven (2022) *Sílicas precipitadas*. México. Extraído de: <https://silicasprecipitadas.com/>

González, I. (2022) *Uso de cenizas procedentes de calderas de biomasa como insumo orgánico en los suelos agrícolas*. Cenit Solar Proyectos e Instalaciones Energéticas Departamento de biomasa. Extraído de: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_Agri%2FAgri_2008_904_168_172.pdf

Haq, I. (2014) *Effect of experimental variables on the extraction of silica from the rice husk ash*. Journal chemical society of Pakistan. Volume 36, issue 3.

IDEA (2018) *Cogeneración*. Madrid, España. Extraído de: <https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/transformacion-de-la-energia/cogeneracion>

Ined, F. (2006) *Prácticas de química farmacéutica*. España. Extraído de: http://www.uv.es/inedfarm/gdocentesf_archivos/cuadernillo_de_practicas.pdf

Jamarillo, R. (2021) *Fuente de nutrientes específicos: Cloruro de potasio*. IPNI Número 3. Extraído de: [http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/A48F7C5B42D2D6BF85257BBA0059A849/\\$FILE/NSS-ES-03.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/A48F7C5B42D2D6BF85257BBA0059A849/$FILE/NSS-ES-03.pdf)

Jimenez, G. (2019) *Técnicas de análisis de silicato*. IES Mercé Rodoreda. Extraído de: http://www.xtec.cat/~gjimene2/llicencia/students/Tecnicas_de_analisis/Molibdosilicato/Molibdosilicato.htm

Junta Regional del Control de Calidad de Agua (2019) *Folleto informativo de pH*. Water Boards, Costa Rica. Extraído de: https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf

Kalopathy, U. (2000) *A simple method for production of pure silica from rice hull ash*. Bioresource technology. ISSN 0906-8524. Extraído de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852499001273>

Kumar, A. (2022) *How to start manufacturing business of precipitated Silica?* Niir Project Consultancy Services. India. Extraído de: <https://www.linkedin.com/pulse/how-start-manufacturing-business-precipitated-silica-gupta>

López, L. (2019) *Economía circular*. Unión Europea. Extraído de: https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2015/12/story/20151201STO05603/20151201STO05603_es.pdf

Martínez M. (2011) *Materiales y materias primas: Silicio*. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Ciudad autónoma de Buenos Aires. Extraído de: <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/silicio.pdf>

McCabe, W., Smith, J., Harriott, P. (1998). “*Operaciones unitarias en ingeniería química*”. 4ª Edición. México; Editorial McGraw Hill.

Melgar, M. (2014) *El cultivo de caña de azúcar*. Litografías Modernas S.A. Cengicaña. Extraído de: <https://cengicana.org/files/20170103101309141.pdf>

Minitab (2023) *Gráficas de contorno y gráficas de superficie 3D*. Minitab Statistical Software. Extraído de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/using-fitted-models/supporting-topics/graphs/contour-plots-and-3d-surface-plots/>

Morales, A. (2003) *Caracterización por espectroscopía en el infrarrojo de óxidos de silicio depositados en ambiente de N₂O*. Centro de investigación y de estudios avanzados del IPN. México D.F. <https://www.redalyc.org/pdf/942/94216205.pdf>

Nicolet, T. (2001) *Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry*. Verona Road. USA. Extraído de: <https://www.chem.uci.edu/~dmitryf/manuals/Fundamentals/FTIR%20principles.pdf>

Omil, B. (2007) *Gestión de cenizas como fertilizante y enmendante de plantaciones jóvenes*. Universidad de Santiago Compostela. Departamento de Edafología y química agrícola. España. Extraído de: https://minerva.usc.es/xmlui/bitstream/handle/10347/2374/9788497509640_content.pdf;jsessionid=902FFCA89E33CEB95F2D7B9E3C973805?sequence=1

Payá J. (2001) *Determination of amorphous silica in rice hush ash by a rapid analytical method*. Extraído de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000888460000466X>

Paz J. & Mirás J. (2007) *Caracterización de las propiedades generales del suelo en una parcela experimental con distintos sistemas de laboreo*. Coruña. Extraído de: <https://core.ac.uk/download/pdf/61899162.pdf>

Pengthamkeerati, P. (2018) *Extracting Silica from Biomass Fly Ash by Using Alkaline Hydrothermal Treatment and Silica Precipitation by Using Organic Acids*. Extraído de: https://www.researchgate.net/publication/324443741_Extracting_Silica_from_Biomass_Fly

[Ash by Using Alkaline Hydrothermal Treatment and Silica Precipitation by Using Organic Acids](#)

Pérez, J. (2021) *¿Sabías que el bagazo de caña es una fuente para generar energía renovable?* Asazgua comunicación. Extraído de: <https://www.azucar.com.gt/2021/12/05/azucar-de-guatemala-bagazo-de-cana-es-una-fuente-para-generar-energia-renovable/#:~:text=por%20Asazgua%20Comunicacion-,%C2%BFSab%C3%ADas%20que%20el%20bagazo%20de%20ca%C3%B1a%20es%20una%20fuente%20para,una%20fuente%20de%20energ%C3%ADa%20renovable.>

Precisa (2019) *What is Loss on ignition* Extraído de: [https://www.precisa.co.uk/what-is-loss-on-ignition-loi/#:~:text=Loss%20on%20Ignition%20is%20a,the%20sample%20ceases%20to%20change.\(LOI\)](https://www.precisa.co.uk/what-is-loss-on-ignition-loi/#:~:text=Loss%20on%20Ignition%20is%20a,the%20sample%20ceases%20to%20change.(LOI))

Ramírez, M. (2008) *Cultivos para la producción sostenible de biocombustibles: Una alternativa para la generación de empleos e ingresos*. Honduras. Extraído de: <http://www.bibalex.org/search4dev/files/289330/120295.pdf>

Razmilic, B. (2018) *Espectroscopía de absorbancia atómica*. Merck Química Chilena. Extraído de: <https://www.fao.org/3/ab482s/AB482S04.htm>

Redug, B. (2022) *Electrocoagulación*. Extraído de: <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/1779/1/1026.pdf> (coloides, soles)

Santiago, M. (2018) *Basic Concepts of Fluorescence*. Scientific Instrumentation Specialist. University of Puerto Rico. Extraído de: <https://www.uprm.edu/geology/wp-content/uploads/sites/111/2017/03/xrf.pdf>

Santisteban J. & et. Al. (2004) *Loss on ignition: a qualitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments?* University Complutense of Madrid. Extraído de: https://eprints.ucm.es/id/eprint/10760/1/2004_1_Loss_ignition_JP.pdf

Seroka, N. S., Taziwa, R. T., & Khotseng, L. (2022). *Extraction and Synthesis of Silicon Nanoparticles (SiNPs) from Sugarcane Bagasse Ash: A Mini-Review*. Applied Sciences, 12(5), 2310. Extraído de: <https://doi.org/10.3390/app12052310>

Silicatos y derivados S. A. (2020) *Silicatos de sodio líquidos/sólidos*. Filial de PQ Corporation. Extraído de: [https://aniq.org.mx/pqta/pdf/Respaldo/folleto%20silicatos%20general%20\(LIT\).pdf](https://aniq.org.mx/pqta/pdf/Respaldo/folleto%20silicatos%20general%20(LIT).pdf)

SME (2023) *Espectroscopía ultravioleta visible*. Universidad de Alicante. Sociedad de Microscopía de España. Extraído de: <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x-de-monocristal-y-espectroscopias-vibracional-y-optica/espectroscopia-ultravioleta-visible.html#:~:text=La%20espectroscop%C3%ADa%20UV%2DVis%20est%C3%A1,electr%C3%B3n%20a%20un%20estado%20excitado>

Subbukrishna D. (2007) *Precipitated silica from Rice husk ash by IPSIT process*. India. Extraído: https://www.researchgate.net/publication/299366171_Precipitated_silica_from_Rice_husk_ash_by_IPSIT_process (metodologías)

Tibco (2022) *¿Qué es Análisis de la Varianza (ANOVA)?* Tibco reference center. Extraído de: <https://www.tibco.com/es/reference-center/what-is-analysis-of-variance-anova>

Todkar,B. (2016) *Extraction of silica from rice husk*. International Journal of Engineering research and development. India. Volume 12, Issue 3, PP 69-74.

Unal (2008) *Óxidos*. Capítulo 2. Colombia. Extraído de: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57218/2.%20%C3%93xidos.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Vidal, D. (2014) *Ceniza de bagazo de caña para la elaboración de materiales de construcción: Estudio preliminar*. Revista de Física, No. 48E. Colombia.

Wittayakun J. (2008) *Synthesis and characterization of zeolite NaY from rice hush silica*. Extraído de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11814-008-0142-y>

Yang, J. (2021) *X-Ray Fluorescence Spectrometry-Theory and practice*. China. Extraído de: https://file.wuxuwang.com/yaopinbz/USP42-NF37/USP42-NF37_237.pdf

Yao, Z. (2010) *The preparation of silica white from fly ash and its characterization*. Beijing, China. Extraído: https://www.researchgate.net/publication/274314280_The_preparation_of_silica_white_from_fly_ash_and_its_characterization

XII. Anexos

A. Datos originales

Cuadro 26.

Parámetros de operación de reflujo para encontrar las mejores condiciones del proceso.

No. de corrida	Relación (SiO ₂ ceniza/NaOH)	Tiempo (min)	Temperatura (±0.5°C)
1	1	90	80.0
2	1.5	165	90.0
3	0.5	165	90.0
4	0.5	90	85.0
5	1.5	240	85.0
6	0.5	240	85.0
7	1	240	90.0
8	1	240	80.0
9	1	165	85.0
10	1.5	90	85.0
11	0.5	165	80.0
12	1	90	90.0
13	1	165	85.0
14	1.5	165	80.0
15	1	165	85.0

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 27.

Mediciones de absorbancia de las muestras de silicato en triplicado.

Muestras de silicato	Absorbancia
1.1	0.141
1.2	0.131
1.3	0.12
2.1	0.281
2.2	0.272
2.3	0.274
3.1	0.163
3.2	0.16
3.3	0.178
4.1	0.014
4.2	0.022
4.3	0.014
5.1	0.18
5.2	0.165
5.3	0.174
6.1	0.099
6.2	0.092
6.3	0.091
7.1	0.321
7.2	0.318
7.3	0.319
8.1	0.045
8.2	0.046
8.3	0.049
9.1	0.041
9.2	0.079
9.3	0.038
10.1	0.046
10.2	0.06
10.3	0.059
11.1	0.317
11.2	0.326
11.3	0.321
12.1	0.099
12.2	0.091
12.3	0.087
13.1	0.417

13.2	0.413
13.3	0.417
14.1	0.049
14.2	0.052
14.3	0.054
15.1	0.038
15.2	0.041
15.3	0.042

Fuente: Elaboración propia.

B. Datos calculados

Cuadro 28.

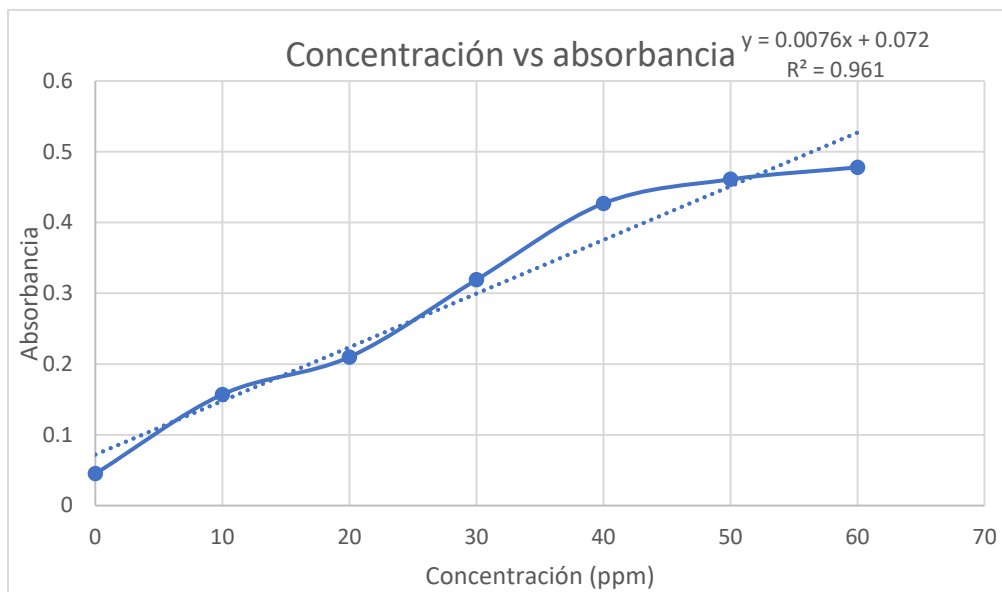
Datos para realización de curva de calibración en mediciones del espectrofotómetro.

Muestra	Concentración (ppm)	Abs	Abs*K
1	0	0.045	0.045
2	10	0.157	0.1571
3	20	0.21	0.2101
4	30	0.319	0.319
5	40	0.427	0.4274
6	50	0.461	0.4608
7	60	0.478	0.4783

Fuente: Elaboración propia.

Figura 38.

Curva de calibración de espectrofotómetro para relación de concentración y absorbancia.



Fuente: Elaboración propia.

La ecuación obtenida de la curva de calibración fue $Y = 0.0076x + 0.072$ siendo X la concentración en ppm, mientras que Y representa la absorbancia medida.

Cuadro 29.

Mediciones de muestras de silicatos producidas a partir de ceniza de bagazo de caña.

Muestras	Muestras de silicato	Concentración (ppm)	Abs promedio de triplicado	Abs desviación estándar	Abs
1	1.1	7.7193	0.1307	0.0105	0.141
	1.2				0.131
	1.3				0.120
2	2.1	26.7982	0.2757	0.0047	0.281
	2.2				0.272
	2.3				0.274
3	3.1	12.5000	0.1670	0.0096	0.163
	3.2				0.160
	3.3				0.178
4	4.1	7.2807	0.0167	0.0046	0.014
	4.2				0.022

	4.3				0.014
5	5.1	13.2895	0.1730	0.0075	0.180
	5.2				0.165
	5.3				0.174
6	6.1	2.8947	0.0940	0.0044	0.099
	6.2				0.092
	6.3				0.091
7	7.1	32.5439	0.3193	0.0015	0.321
	7.2				0.318
	7.3				0.319
8	8.1	3.3333	0.0467	0.0021	0.045
	8.2				0.046
	8.3				0.049
9	9.1	2.5439	0.0527	0.0229	0.041
	9.2				0.079
	9.3				0.038
10	10.1	2.2368	0.0550	0.0078	0.046
	10.2				0.06
	10.3				0.059
11	11.1	32.8070	0.3213	0.0045	0.317
	11.2				0.326
	11.3				0.321
12	12.1	2.6754	0.0923	0.0061	0.099
	12.2				0.091
	12.3				0.087
13	13.1	45.2193	0.4157	0.0023	0.417
	13.2				0.413
	13.3				0.417
14	14.1	2.6754	0.0517	0.0025	0.049
	14.2				0.052
	14.3				0.054
15	15.1	4.1667	0.0403	0.0021	0.038
	15.2				0.041
	15.3				0.042

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 30

Ecuación de regresión de la superficie de respuesta.

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento} = & 1.0 - 4.00x - 0.0067y + 0.031z \\ & + 0.940x^2 - 0.000000y^2 \\ & - 0.00027z^2 + 0.00508 x*y \\ & + 0.0178 x*z + 0.000014 y*z \end{aligned}$$

En donde,

X = relación.

Y = Tiempo.

Z = Temperatura.

En esta ecuación se puede observar que el rendimiento está en función de las variables x, y, z que son las variables independientes.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 31.

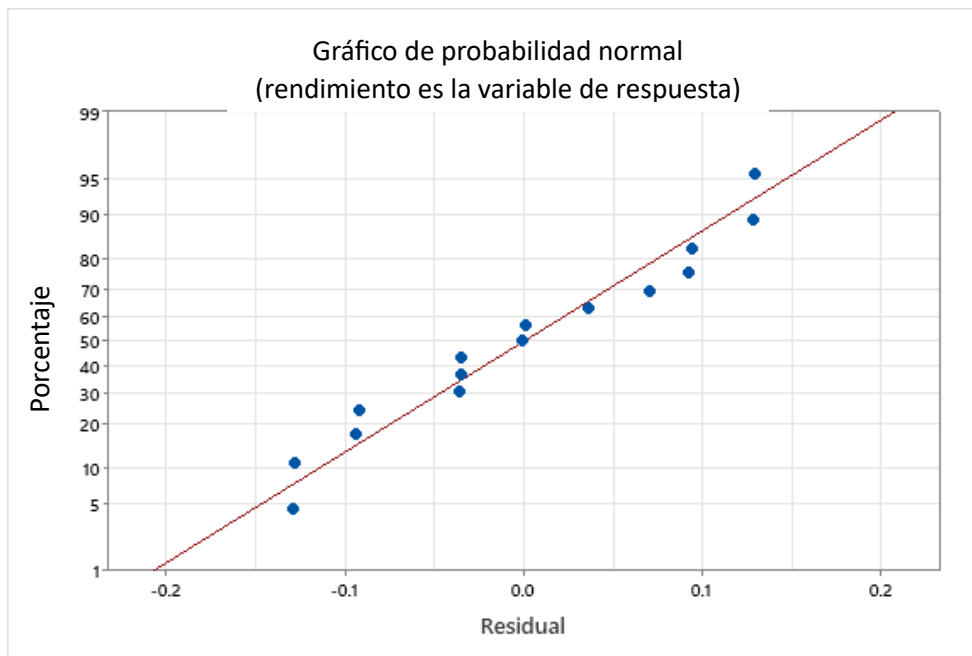
Análisis de varianza para encontrar los mejores parámetros de operación del reflujo

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor- F	Valor- P
Modelo	9	0.485209	0.053912	2.42	0.172
Lineal	3	0.124573	0.041524	1.86	0.253
Relación	1	0.109372	0.109372	4.91	0.078
Tiempo	1	0.011499	0.011499	0.52	0.505
Temperatura	1	0.003702	0.003702	0.17	0.700
Cuadrática	3	0.207389	0.069130	3.10	0.127
Relación*Relación	1	0.203958	0.203958	9.15	0.029
Tiempo*Tiempo	1	0.000004	0.000004	0.00	0.990
Temperatura*Temperatura	1	0.000173	0.000173	0.01	0.933
Interacción entre variables	3	0.153248	0.051083	2.29	0.195
Relación*Tiempo	1	0.145237	0.145237	6.52	0.051
Relación*Temperatura	1	0.007903	0.007903	0.35	0.577
Tiempo*Temperatura	1	0.000107	0.000107	0.00	0.947
Error	5	0.111407	0.022281		
Falta de alineación	3	0.103903	0.034634	9.23	0.099
Error puro	2	0.007505	0.003752		
Total	14	0.596617			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 39.

Gráfica de probabilidad normal de los datos recolectados.

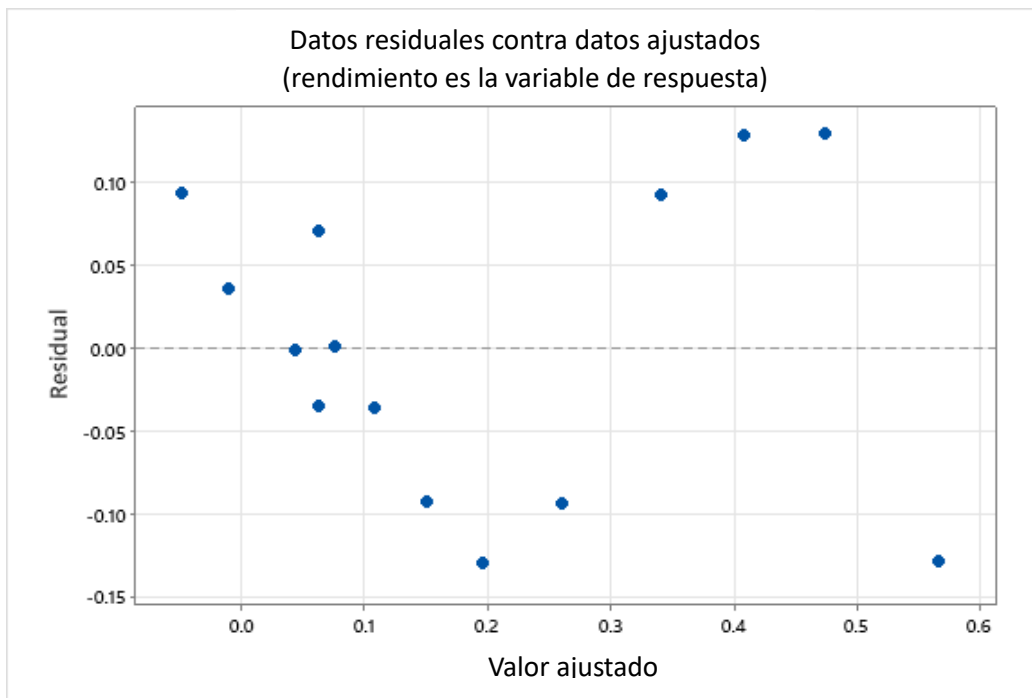


En la gráfica de probabilidad normal de valores residuales, se observar que pocos puntos se encuentran alejados de la línea, esto implica una distribución con valores atípicos.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 40.

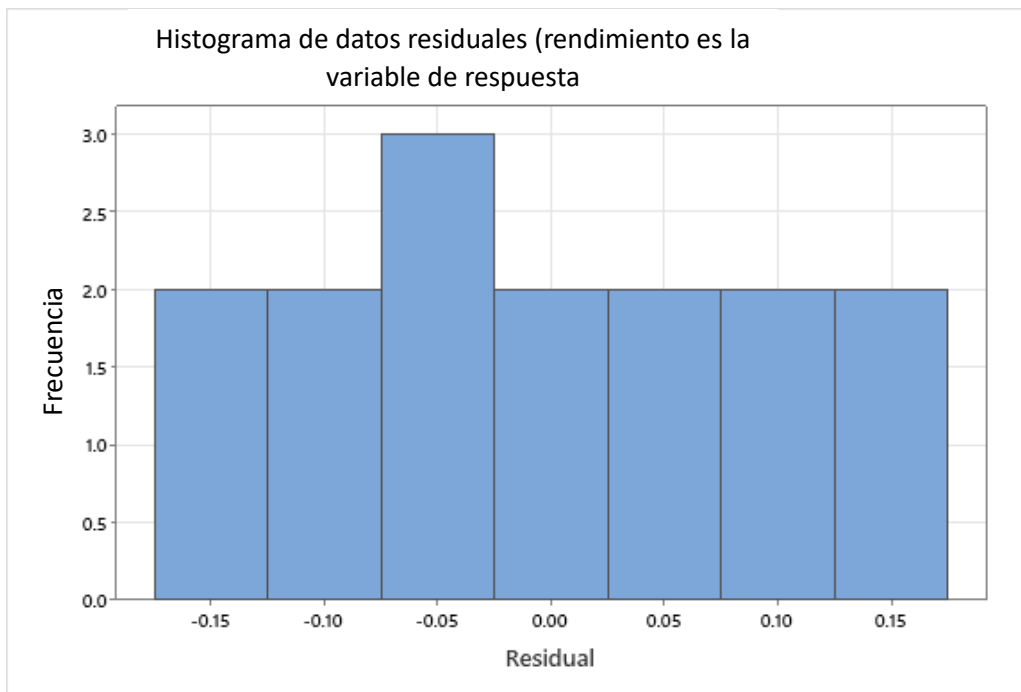
Gráfico de datos residuales contra los datos ajustados.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 41.

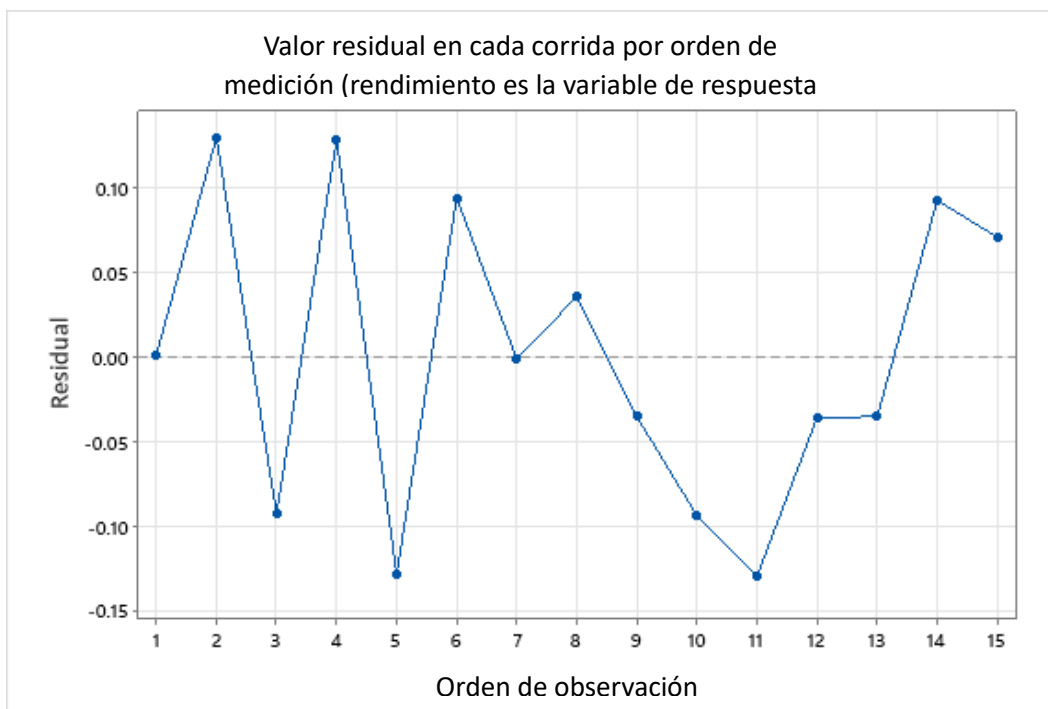
Histograma en respuesta de rendimiento para observar frecuencia de valor residual.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42.

Gráfica de los valores residuales en el orden que los datos se recolectaron.



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 32

Datos de tamaño de partícula obtenidos del análisis granulométrico de la ceniza de bagazo de caña.

Mesh	Masa (g)	n	%	Tamaño de partícula (um)	Tamaño de partícula (mm)	% que pasa
20	0.42	0.0043	0.43	850	0.85	99.57
30	0.49	0.0050	0.50	600	0.6	99.08
45	0.57	0.0058	0.58	355	0.355	98.50
60	0.78	0.0079	0.79	250	0.25	97.71
80	1.43	0.0145	1.45	180	0.18	96.25
100	2.74	0.0278	2.78	150	0.15	93.47
115	92.1	0.9347	93.47	125	0.125	0.00
Total	98.53					

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 33.

Cálculo de peso molecular de ceniza basado en diferentes componentes de la ceniza. Se muestran proporciones en %m/m y pesos moleculares.

Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂	TiO ₂	LOI	Total
5.62	6.35	0.02	3.02	7.77	3.73	0.08	1.07	2.77	0.11	54.12	0.25	14.88	99.79
101.96	56.07	151.99	159.69	94.2	40.3	70.94	61.98	283.89	80.06	60.08	79.87	0.00	64.35

El total de 64.35g/mol es el resultado final obtenido para la caracterización.

Fuente: Elaboración propia.


Figura 43


Lectura de rayos X de fluorescencia para muestra de ceniza hecho Cementos Progreso

INFORME DE ENSAYO
ANÁLISIS QUÍMICO
MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

*COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)														
Muestra	Al2O3	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	TiO2	LOI (950 °C)	Total
1 Ceniza PH	5.62	6.35	0.02	3.02	7.77	3.73	0.08	1.07	2.77	0.11	54.12	0.25	14.88	99.79
2 Ceniza I	1.25	19.92	0.01	0.77	4.52	2.38	0.06	0.11	1.86	0.42	10.83	0.05	55.96	98.13
--Ultima Linea--														

* Expresada como porcentaje en masa (w/w).

 Analista

 Jefe de Laboratorio/Coordinador

OBSERVACIONES

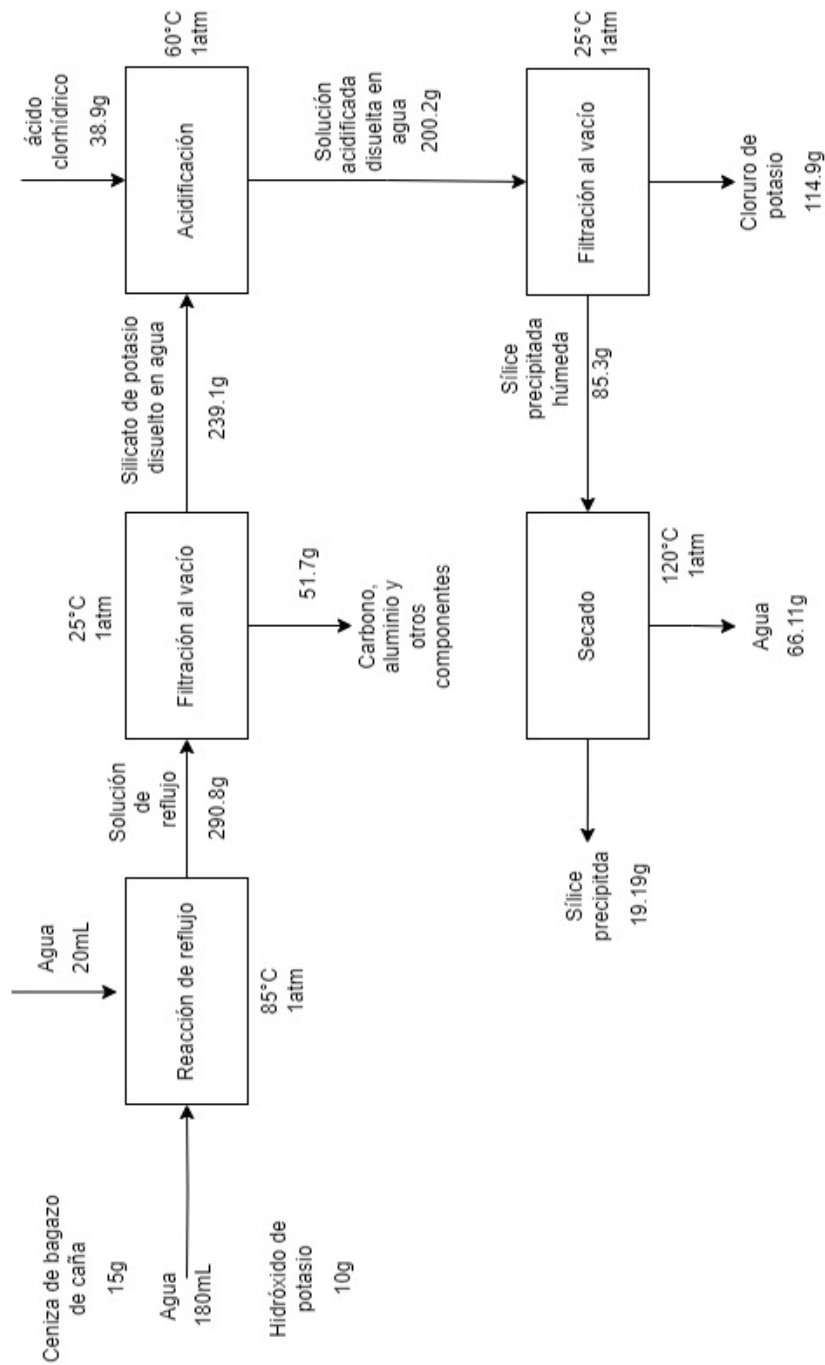
Laboratorio CETEC no se hace responsable de los usos que se le darán a este informe. Este informe no es un certificado de calidad. Muestra realizado por el cliente. Es responsabilidad del cliente la veracidad de la información proporcionada para la OT. CETEC proporciona únicamente resultados del(los) ensayo(s) realizado(s). Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse este informe, a menos que se haga íntegramente. Este informe es original si cuenta con holograma de seguridad, el cual está identificado con un correlativo único, para verificar la validez del informe puede comunicarse al 2286-4178 o al correo laboratoriocetec@cempro.com.

SGL-OT-QC-IE-00/Rev. 1

Prueba realizada en laboratorios en Cementos Progreso.

Figura 44.

Diagrama de proceso del proceso de producción de sílice precipitada a partir de ceniza de bagazo de caña.



Fuente: Elaboración propia.

C. Cálculos de muestra

Cálculos para caracterización de ceniza a partir de bagazo de caña.

Cálculo 1. Determinación de humedad de la ceniza utilizada para la producción de sílice precipitada.

Basado en la siguiente ecuación:

$$\omega(\%) = \frac{W_w * 100}{W_s}$$
$$\omega(\%) = \frac{0.255 (\pm 0.001g) * 100}{10g} = 2.55\%$$

De la misma forma se realizó para todas las muestras de ceniza

Cálculo 2. Cálculo de número de datos determinados para realizar el box-Behnken.

$$N = 2 * 3(3 - 1) + 3 = 15$$

Se realizó un muestreo de 15 corridas con las tres variables independientes para obtener un rendimiento del silicato obtenido.

Cálculos de muestra para determinación de silicatos de potasio en espectrofotómetro.

Cálculo 3. Determinación de concentración de óxido de silicio en meta silicato de potasio obtenido para la solución madre.

$$4.73g \text{ de metasilicato de potasio} * \frac{1 \text{ mol metasilicato}}{122.06g \text{ metasilicato}} * \frac{1 \text{ mol SiO}_2}{1 \text{ mol metasilicato}}$$
$$* \frac{60.08g \text{ SiO}_2}{1 \text{ mol SiO}_2} * \frac{1g}{1000mL} * \frac{1000mL}{1L} * \frac{1000mg}{1g} = 2328ppm \text{ de SiO}_2$$

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo 4. Determinación de volumen de solución madre para la solución de ácido oxálico.

$$V1 = \frac{C2V2}{C1}$$

Para preparar solución de 50mL y 10 ppm,

$$V1 = \frac{10.00\text{ppm} * 50.00\text{mL}}{2328.19\text{ppm}} = 0.2147\text{mL de solución madre}$$

Fuente: Elaboración propia.

Este cálculo se realizó para las diferentes concentraciones para la realización de la curva de calibración.

Cálculo 5. Determinación de concentración de solución de ácido clorhídrico para análisis en espectrofotómetro.

$$100\text{mL} * \frac{1 \text{ mol HCl}}{1000\text{mL}} * \frac{36.4604\text{g}}{1 \text{ mol}} * \frac{100\text{g solución}}{37\text{g HCl}} * \frac{1\text{mL}}{1.19\text{g}} = 8.28\text{mL HCl}$$

Cálculo 6. Determinación de cantidad de SiO₂ en muestra de 20g de ceniza utilizada en experimentación.

$$\frac{20.08\text{g Si}}{1 \text{ mol Si}} * \frac{1 \text{ mol Si}}{1 \text{ mol SiO}_2} * \frac{1 \text{ mol SiO}_2}{60.08\text{g SiO}_2} * 10.824\text{gSiO}_2 = 5.056\text{g SiO}_2$$

En 20 gramos de ceniza hay 10.824g de SiO₂ que representa el 54.12% de composición en la ceniza.

Cálculo 7. Cálculo de rendimiento de sílice precipitada de todo el proceso.

$$\frac{4.187\text{g SiO}_2}{5.056\text{gSiO}_2} * 100 = 82.81\%$$

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo 8. Determinación de concentración de ppm a partir de la absorbancia medida.

$$Y = 0.0076X + 0.072$$

En base a esta ecuación se quiere encontrar la concentración en ppm, para la corrida 1.

$$X = \frac{0.1307abs - 0.072}{0.0076} = 7.72ppm$$

Fuente: Elaboración propia.

Este cálculo se realizó para el resto de las corridas utilizando la misma ecuación de la curva de calibración.

Cálculo 9. Determinación de rendimiento en la muestra

Para la corrida 1 siendo la concentración inicial de 75ppm y la concentración final de 45.22ppm.

$$\frac{45.22ppm}{75.9ppm} = 0.6029 \approx 60.29\%$$

Este cálculo se realizó para el resto de las corridas, utilizando esta ecuación.

D. Análisis de error

Cálculo 10. Determinación de media de absorbancias obtenidas de análisis en espectrofotómetro.

$$\frac{0.1410 + 0.1310 + 0.1200}{3} = 0.1307abs$$

Fuente: Elaboración propia.

De la misma forma se calcularon las medias de cada muestra en triplicado.

Cálculo 11. Determinación de desviación estándar de la absorbancia obtenida de las lecturas en espectrofotómetro.

$$0.0105_{abs} = \sqrt{\frac{|0.1410 - 0.1307| + |0.1310 - 0.1307| + |0.1200 - 0.1307|}{3}}$$

Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera se calcularon las desviaciones estándar de los diferentes datos en triplicado y otras variables.

Cálculo 12. Determinación de incertidumbre de silicato de potasio posterior a la filtración.

$$S = \pm 0.001g \pm 0.2500g \pm 0.001g = \pm 0.2520g$$

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo 13. Determinación de incertidumbre de sílice precipitada como producto final.

$$S = \pm 0.001g + \pm 0.2500g \pm 0.001g \pm 0.001g \pm 0.005g = 0.2570g$$

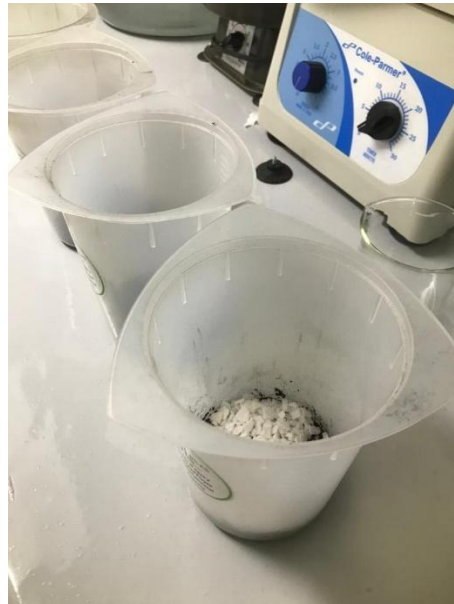
Fuente: Elaboración propia.

E. Imágenes de experimentación

Toda la experimentación se realizó en las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala, especialmente en los laboratorios del departamento de Ingeniería Química.

Figura 45.

Mezcla de hidróxido de potasio y ceniza de bagazo de caña en primeras experimentaciones. (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 46.

Sistema de reflujo con ceniza, hidróxido de potasio y agua. (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 47.

Filtración al vacío de solución de reflujo con ceniza, hidróxido de potasio y agua.
(Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

La filtración al vacío realizada después del reflujo en el sistema es para obtener el silicato extraído de la reacción, se obtienen dos fases, la fase acuosa que es el silicato ya que es soluble en agua y la fase sólida que es el resto de compuestos que no son de interés (carbono, aluminio, entre otros).

Figura 48.

Técnica de filtración al vacío (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 49.

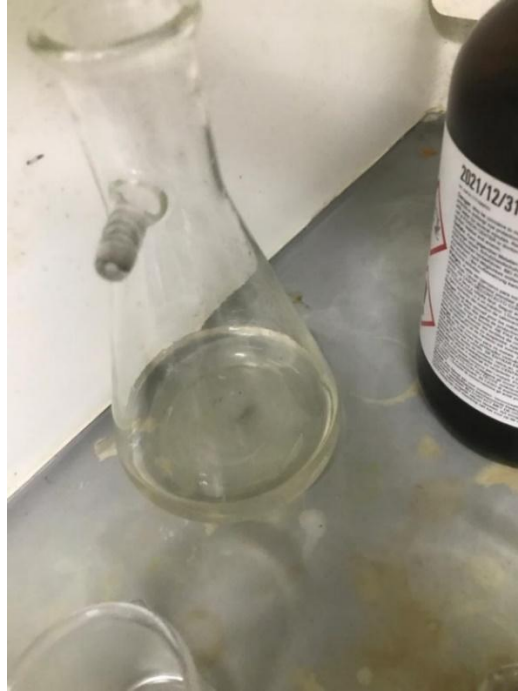
Fase sólida de la primera filtración que contiene compuestos que no son de interés (subproducto). (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 50.

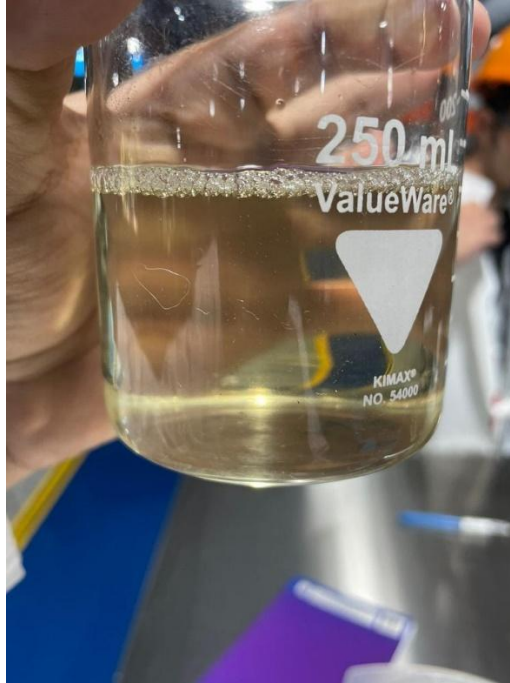
Fase acuosa obtenida de primera filtración al vacío, solución de silicato de potasio.
(Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 51.

Fase acuosa de silicato de potasio obtenido después del reflujo y filtración al vacío
(Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 52.

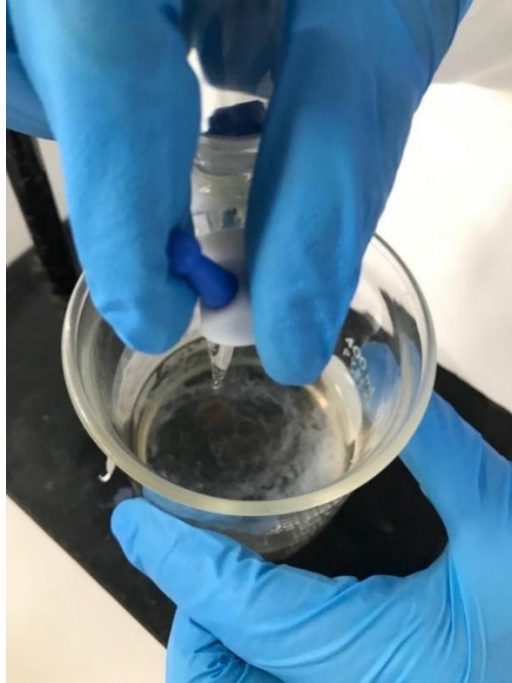
Sistema de acidificación de solución de silicato de potasio con ácido clorhídrico.
(Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 53.

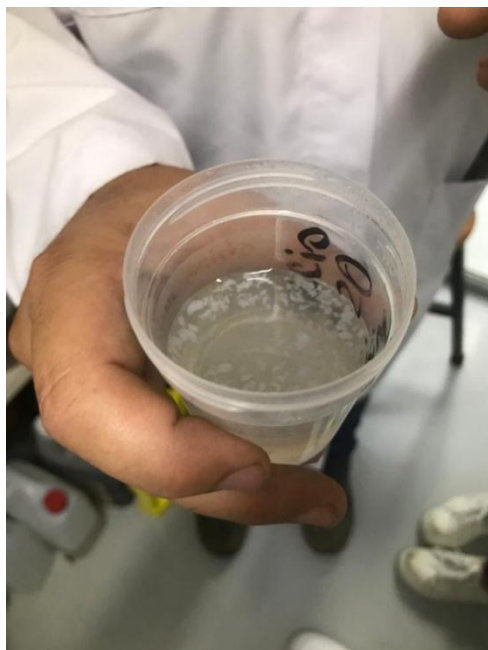
Acidificación de solución de silicato de potasio con ácido clorhídrico. (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 54.

Formación de precipitado en solución de silicato de potasio acidificada (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 55.

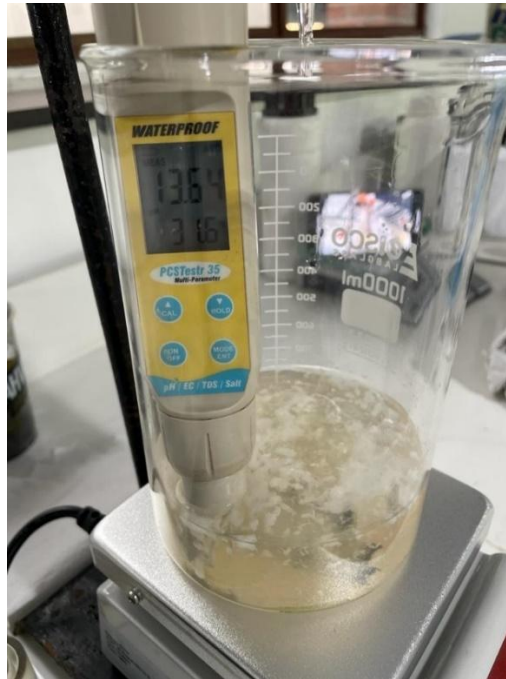
Bureta, varilla y beaker utilizado para acidificación (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 56.

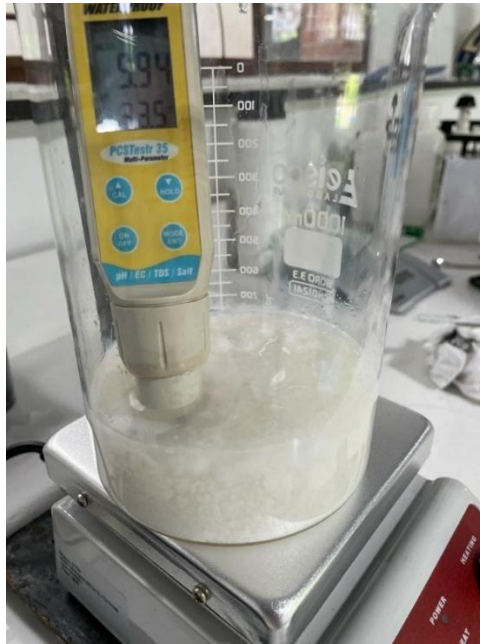
Monitoreo de inicio con pH básico durante la acidificación de silicato con ácido clorhídrico (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 57.

Monitoreo del final con pH ácido durante la acidificación de silicato con ácido clorhídrico (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 58.

Solución de silicato de potasio acidificada completamente (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 59.

Segunda filtración al vacío posterior a acificación para obtener sílice precipitada húmeda
(Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 60.

Sílice precipitada húmeda obtenida luego de la filtración al vacío del silicato (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 61.

Sílice precipitada húmeda obtenida luego de filtración al vacío de silicato (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 62.

Sílice precipitada húmeda obtenida posterior a filtración al vacío (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 63.

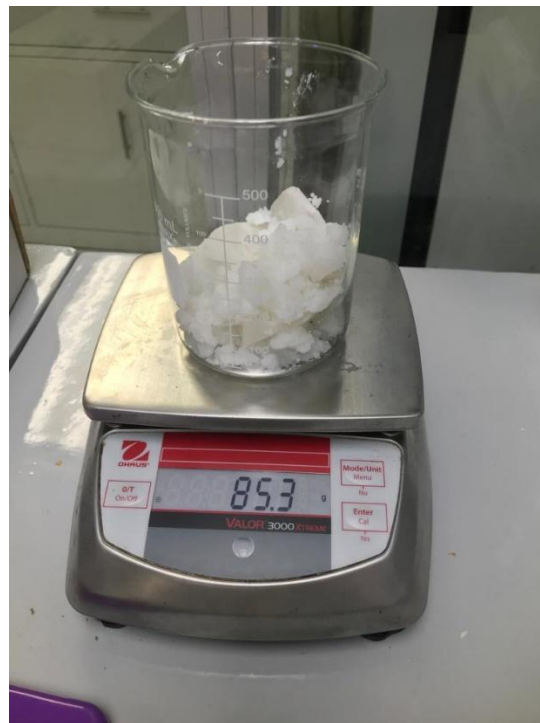
Sílice precipitada comercial para comparación del producto obtenido (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 64.

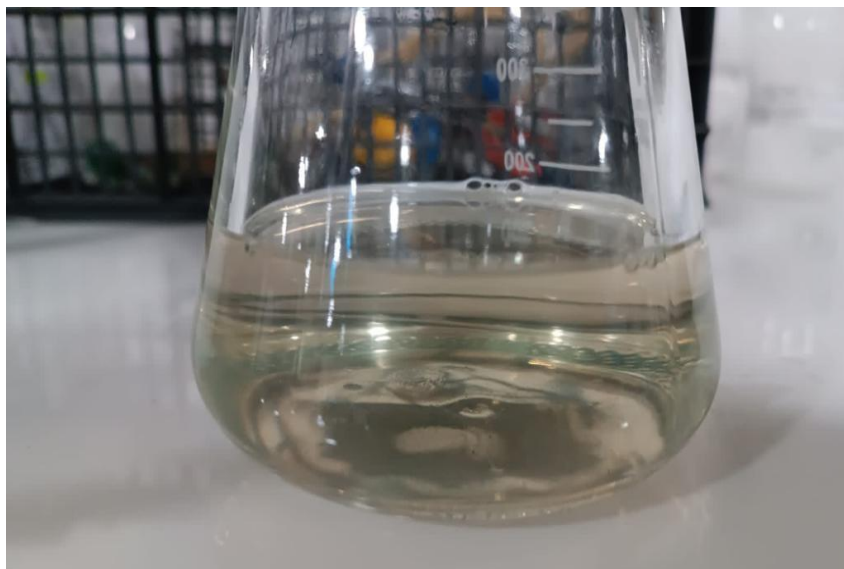
Pesado de sílice precipitada húmeda (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 65.

Subproducto cloruro de potasio posterior de separación con sílice precipitada potencial uso como fertilizante (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 66.

Productos y subproductos obtenidos en el proceso de producción (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 67.

Espectrofotómetro de absorbancia para determinación de concentración de silicatos.
(Laboratorio de microbiología, UVG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 68.

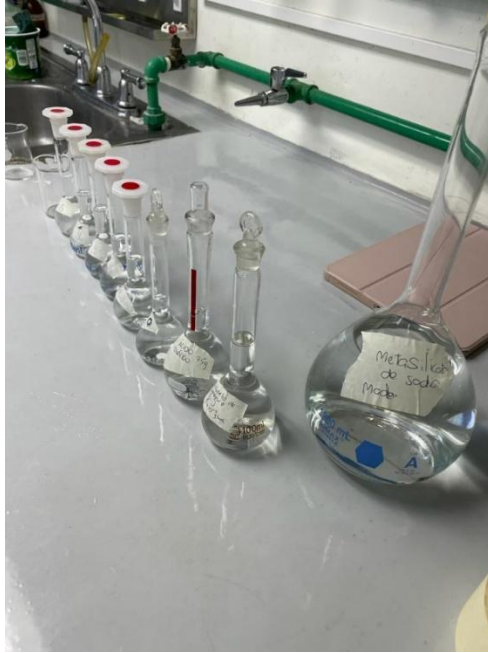
Soluciones preparadas para la cuantificación de silicato en muestras para buscar las mejores condiciones de operación (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 69.

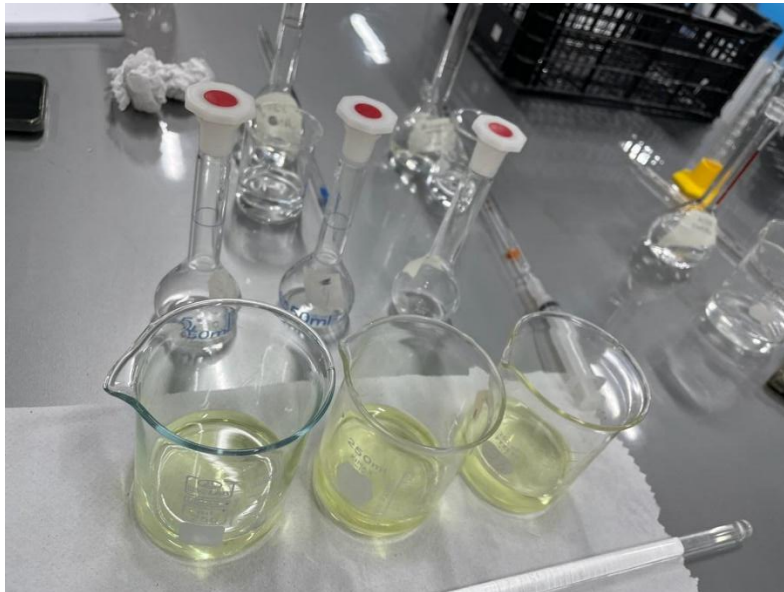
Soluciones preparadas para cuantificación de silicato de potasio (Laboratorio de Operaciones Unitarias, UVG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 70.

Soluciones para cuantificación de silicato de potasio por medio de colorimetría y absorbancia (Laboratorio de microbiología, UVG)



Fuente: Elaboración propia.

F. Muestreo de la ceniza

En la caracterización de la ceniza de bagazo de caña, las muestras fueron extraídas de un solo punto de los hornos del bagazo de caña de azúcar, como se indicó en la discusión, sin embargo, es importante resaltar que para que las muestras utilizadas fueran más representativas se tiene que realizar una metodología detallada del muestreo. Este muestreo tiene que seguir un método que puede ayudar a obtener resultados adecuados de acuerdo con las características de la ceniza y especificaciones del proceso que se someterá.

Lo primero es identificar los puntos de muestreo, es importante determinar donde la ceniza es determinante, en este caso especialmente las áreas críticas donde hay acumulación de cenizas ya sean del tipo volantes o no volantes y estén disponibles para el proceso de producción de sílice precipitada. En las calderas del ingenio hay dos puntos de salida, están las cenizas volantes (salen con gases de combustión) y cenizas no volantes (salen de parrilla). El ingenio lava la ceniza volante obtenida con los gases de combustión, por lo que, al tener un costo adicional de secado para trabajar con este material, esta se descarta. En este caso los puntos de interés para la investigación son en las muestras del horno, la salida del horno y antes de entrar al transporte o bodega de almacenamiento, que es ceniza no volante. Para obtener esta ceniza se espera a que la parrilla saque este material, ya que se encuentra a altas temperaturas y contaminantes orgánicos.

Luego las herramientas de muestreo son de vital importancia para utilizar los instrumentos adecuados para el muestreo, asegurarse que estén limpios para así, se eviten contaminaciones a las muestras tomadas en los ingenios posterior a la quema del bagazo de caña de azúcar.

Posterior se planifica la frecuencia de muestreo, ya que es de vital importancia determinar cada cuanto se realizará la toma de muestra, esta frecuencia puede depender de factores como velocidad del proceso, variabilidad de ceniza, tipo de ceniza, entre otros factores. Además, las condiciones en que se realizará el muestreo son importantes. Se recomienda utilizar un solo método definido para que haya poca variabilidad en los resultados de la caracterización.

Procedimiento para realizar el muestreo:

En los puntos de muestreo determinados anteriormente asegurarse que estén en condiciones estables, luego con la herramienta de muestreo, este puede ser un recipiente de plástico o vidrio del mismo volumen para estandarizar la muestra, e importante que pueda contener la muestra, en este caso la ceniza y pueda ser almacenada sin afectar sus propiedades, así asegurando evitar la contaminación externa de la muestra. La muestra tiene que ser representativa para poder realizar distintas mediciones. Esto puede hacerse en triplicado o en mayor número de muestra idealmente.

Luego de contar con todas las muestras, conforme se van recolectando es importante etiquetarlas e identificarlas con la información clave y relevante, como punto de muestreo, fecha y número de muestra. Además, puede influir la temperatura, presión y humedad del punto de muestreo por lo que se recomienda tomarlo en cuenta. Para el transporte de muestras al laboratorio se tiene que llevar en recipientes adecuados y a las condiciones adecuadas.

Luego, se realizan los análisis de las muestras indicadas para determinar sus propiedades fisicoquímicas y características físicas para determinar una caracterización de la materia prima obtenida de los puntos de muestreo. Entre los distintos análisis que se hacen está análisis granulométrico, químico, espectroscópico entre otros. De ellos ya se sacan resultados y se determina la composición, además de la calidad y cantidad de la muestra obtenida para validar el método y pueda empezarse a utilizar en el proceso de producción de sílice precipitada. Si existe algún problema en los resultados, se tienen que buscar acciones correctivas para mejorar la recolección y tratamiento de las muestras de ceniza de bagazo de caña de azúcar.

Es importante resaltar que la precisión y las cantidades obtenidas de muestras son clave para obtener resultados estadísticamente representativos. Esto con el fin de estandarizar los procesos y lograr de la mejor manera sílice precipitada que es en este caso el producto de interés.

XIII. Glosario

Ceniza de bagazo de caña: Es un residuo que deriva del proceso de fabricación de azúcar. Al momento de quemar la caña de azúcar para generar energía es uno de los principales subproductos obtenidos. Mayoritariamente óxido de silicio.

Coloide: Es una mezcla no homogénea de dos o más fases (gas, líquido o sólido) en las que una de ellas es menor a un micrómetro. Se encuentran en un estado intermedio entre las soluciones y suspensiones.

Economía circular: Es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, renovar y reciclar materiales y productos existentes en todas las posibles veces que sea posible brindarle un valor añadido.

Espectrofotometría: Es una de las técnicas experimentales más utilizadas para la detección específicas de moléculas. Se caracteriza por el análisis por medio de cuanta luz absorbe una sustancia química, y en función a la intensidad de la luz se puede determinar concentración y presencia del compuesto analizado.

Fertilizante: Es una sustancia destinada a abastecer y suministrar los elementos químicos al suelo o al follaje para que la planta los absorba.

Higroscópico: Compuestos que absorben agua en forma de vapor o líquido en el ambiente. Estos compuestos a menudo son utilizados como desecantes.

Humedad: Es una medida que indica la cantidad de vapor de agua en el aire.

Loss on ignition: Es una prueba que es utilizada en química inorgánica y análisis de suelos para determinar el cambio de peso en una muestra después de ser sometido a altas temperaturas causando que contenido del compuesto se volatilice o se queme.

Método de superficie de respuesta: Es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo.

Rendimiento: Es la cantidad de producto obtenido a partir de los reactivos de una reacción. Se utiliza para conocer la eficiencia de una reacción.

Residuo: Materia inservible que resulta de la descomposición o destrucción de una cosa.

Silicato: son el grupo de minerales de mayor abundancia, pues constituyen el 95 % de la corteza terrestre, además del grupo de más importancia geológica por ser petrogénicos, es decir, los minerales que forman las rocas. Todos los silicatos están compuestos por silicio y oxígeno.

Sílice precipitada: Son sustancias en forma de polvos inertes que no poseen componentes cristalinos y no son tóxicos para el humano y el medio ambiente, comúnmente se les conoce como dióxido de silicio.

Sólido amorfo: es un estado sólido de la materia, en el que las partículas que conforman el sólido no poseen una estructura ordenada.

Solución alcalina: se forman cuando se disuelve un álcali en agua. Una solución alcalina se puede sintetizar en el laboratorio y también puede formarse en procesos naturales, como la erosión.