

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

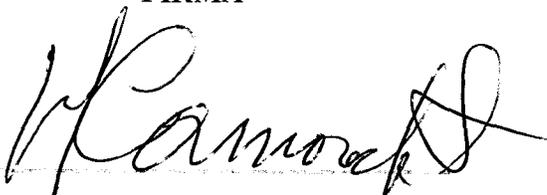
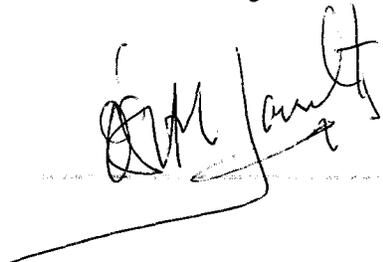
**Determinación de las propiedades filtrantes de lechos contruidos a partir de
bagacillo de cabuya utilizando aguas residuales**

Proyecto de graduación
sometido a la consideración
de la Escuela de Ingeniería Química
como requisito final para optar al grado de
Licenciatura en Ingeniería Química.

Realizado por:
Meybol Duarte Barrantes

Ciudad Universitaria “Rodrigo Facio”
San José, Costa Rica
2010

TRIBUNAL

NOMBRE	FIRMA
Ing. Hernán Camacho M.Sc Director Escuela de Ingeniería Química Presidente del tribunal	
Ing. Alexander Vásquez Calvo M.Sc Profesor adjunto Escuela de Ingeniería Química Director del proyecto	
Ing. Adolfo Ulate Brenes M.Sc Profesor instructor Escuela de Ingeniería Química Miembro lector del tribunal	
Inga. Bárbara Miranda Morales Profesora Escuela de Ingeniería Química Miembro lector del tribunal	
Ing. Oscar Jaubert Calvo M.Sc Profesor Escuela de Ingeniería Química Miembro lector del tribunal	

DEDICATORIA

*A mi madre por todo el amor y confianza depositada en mí,
Por brindarme fortaleza y consuelo a lo largo de estos años.*

“Es justamente la posibilidad de realizar un sueño lo que hace que la vida sea interesante”

Paulo Coelho

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios primeramente, sin él esto no hubiese sido posible, a mi familia y amigos por creer en mí y su apoyo incondicional.

Al señor Ronald Araya Molina de Compañía Sur Química S.A., al Ing Carlos Garita, a Olman y a Carlos del Laboratorio de Ingeniería Química y a los miembros del tribunal, especialmente a mi director de proyecto por toda la paciencia y consejos que me ha dado para que este proyecto saliera adelante y concluirse.

Por último quiero agradecer a Alejandro por el amor y la dedicación que me ha dado a través de todos estos años que estuvimos juntos.

RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto es determinar las propiedades filtrantes de un lecho construido a partir de bagacillo de cabuya utilizando aguas residuales. Como primer paso, se secó y se tamizó el bagacillo, seleccionando las partículas retenidas en las mallas #8, #20 y #50. Se caracterizó el bagacillo realizando pruebas tales como: el porcentaje de porosidad, densidad aparente, drenabilidad y peso específico. De los tres tamices seleccionados el de malla #50 fue el que presentó el mayor porcentaje de porosidad con un valor del 77,56%, de densidad aparente con un valor de 171 kg/m^3 y un peso específico con un valor de 1250 kg/m^3 , mientras que el tamiz de malla #8 fue el que presentó la mayor drenabilidad con un valor de $4,32 \cdot 10^{-04} \text{ m}^3$.

Se realizaron pruebas de filtración al vacío con aguas residuales suministradas por una compañía de pinturas, así como el floculante y el coagulante utilizado. Se realizaron las pruebas con el bagacillo de cabuya con el tamaño de partícula de los tres tamices seleccionados y se comprobó que bajo las condiciones experimentales estudiadas, los tres tamaños de partículas presentaron una resistencia específica del lecho despreciables, así como también una resistencia del medio filtrante despreciable, como tampoco las pruebas realizadas con floculante y coagulante que se realizaron con el lecho del tamaño de partícula malla #50.

Para este proyecto las variables de perturbación fueron: el tipo de malla de tamiz seleccionada, las concentraciones de las disoluciones con floculante y coagulante y el volumen de las disoluciones. Las variables de respuesta fueron: el porcentaje de rendimiento de las pruebas de turbidez, sólidos totales y DQO antes y después de la filtración y el tiempo de filtración a través del lecho. Las variables de estudio fueron: La resistencia específica de la torta (α), la resistencia del medio filtrante (R_m), la densidad aparente, la porosidad, la drenabilidad y el peso específico del bagacillo de cabuya. Las variables fijas controlables fueron: el tipo de aguas residuales, la presión de vacío, la temperatura de las aguas residuales, el tamaño de los porómetros, la altura del lecho, el diámetro del büchner, el diámetro del empaque de hule y la malla de cedazo, el tiempo de drenabilidad para la caracterización del bagacillo de cabuya y la temperatura de secado. Las variables no controlables fueron: el porcentaje de humedad del bagacillo de Cabuya, la temperatura ambiente, la presión atmosférica, la caída de presión a través del lecho y la cantidad de sólidos suspendidos y totales de las aguas residuales.

Por otra parte, se realizaron pruebas de filtración a presión atmosférica, y los tamaños de partículas del bagacillo de cabuya mallas #8 y #20 mostraron una resistencia específica del lecho y del medio filtrante despreciables, sin embargo la malla #50 si presentó una resistencia específica con un valor de $7,54 \cdot 10^{09} \text{ m/kg}$ y una resistencia del medio filtrante con un valor de $6,12 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$, al realizar la misma prueba en malla #50 pero utilizando 0,5 mL de floculante y 15 mL de coagulante se obtuvo una resistencia específica de $1,07 \cdot 10^{09} \text{ m/kg}$ y una resistencia del medio filtrante de $4,71 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$, y utilizando 1 mL de floculante y 15 mL de coagulante se obtuvo una resistencia específica de $2,37 \cdot 10^{09} \text{ m/kg}$ y una resistencia del medio filtrante de $6,12 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$. Se obtuvieron porcentajes de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos

totales en todas las pruebas de filtración realizadas y se obtuvo que los mayores rendimientos los mostró el lecho construido con bagacillo de cabuya de malla #50.

Como se comprobó que el bagacillo de cabuya sirve como medio filtrante, se recomienda para un proyecto posterior el uso de éste, en una filtración continua, donde se compruebe el punto de saturación del lecho, con otro tipo de aguas residuales, además de realizar las pruebas con una mayor profundidad de lecho filtrante y utilizando tamaños menores de diámetro de partículas (malla #80 o malla #100), así como hacer repeticiones de todas las pruebas de filtración, con el fin de tener un análisis estadístico mejor de los resultados.

INDICE GENERAL

	Página
Comité Asesor	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Resumen	v
1. Introducción	1
2. Marco teórico	2
2.1 Furcraea cabuya	2
2.2 Características taxonómicas de la cabuya	3
2.2.1 Descripción botánica	3
2.2.2 Características de la fibra de la cabuya	4
2.2.3 Duración de la plantación	4
2.2.4 Clima y suelo	5
2.3 Filtración	5
2.3.1 Tipos de filtración de acuerdo a las características del medio filtrante	6
2.3.1.1 Filtración superficial	6
2.3.1.2 Filtración sobre lecho filtrante	6
2.3.2 Tipos de filtración de acuerdo al comportamiento de la presión durante el proceso	7
2.3.2.1 Filtración a presión constante	7
2.3.2.2 Filtración a velocidad constante	7
2.3.2.3 Régimen mixto	8
2.3.3 Clasificación de los filtros por fuerza motriz aplicada o fuerza impulsora	8
2.3.3.1 Filtración por gravedad	8
2.3.3.2 Filtración por presión	9
2.3.3.3 Filtración por vacío	9
2.3.3.4 Filtración por centrifugación	10
2.3.4 Clasificación de filtros según método de separación	10
2.3.4.1 Filtros de presión discontinuos	10
2.3.4.2 Filtros continuos a vacío	12
2.3.4.3 Variables que intervienen en la elección del filtro	13
2.3.5 Medios filtrantes	13
2.3.5.1 Selección del medio filtrante	14
2.3.6 Coadyuvante de filtración	14
2.3.7 Fundamentos de filtración	15
2.3.7.1 Resistencia específica de la torta	16
2.3.7.2 Resistencia del medio filtrante	16
2.3.7.3 Filtración a presión constante	17
2.4 Aguas Residuales	17
2.4.1 Técnicas de muestreo	18
2.4.1.1 Muestreo simple	19
2.4.1.2 Muestreo compuesto	19
2.4.2 Pruebas físicas y químicas	20
2.4.2.1 Turbidez	20
2.4.2.2 Sólidos totales y sedimentables	21

2.4.2.3 Demanda química de oxígeno (DQO)	22
3. Metodología, equipo y diagrama experimental	23
3.1 Metodología	23
3.1.1 Acondicionamiento del bagacillo de Cabuya	23
3.1.2 Caracterización del bagacillo de Cabuya	23
3.2 Equipo experimental	29
3.3 Diagrama experimental	29
4. Discusión de resultados	31
5. Conclusiones y recomendaciones	53
6. Nomenclatura	55
7. Bibliografía	56
Apéndice	58
A. Resultados experimentales	59
B. Resultados intermedios	69
C. Muestra de cálculo	75
Anexos	78

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1 Porómetros contruidos para la caracterización del bagacillo de cabuya.	24
Figura 3.2 Orificios de 5 mm de diámetro de la tapa del fondo de cada porómetro.	25
Figura 3.3 Posición del empaque y cedazo metálico sobre el lecho de bagacillo de cabuya en el embudo büchner.	26
Figura 3.3.1 Diagrama experimental para la filtración al vacío.	30
Figura 3.3.2 Diagrama experimental para la filtración a presión atmosférica.	30
Figura 4.1.1 Drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #50 utilizando bagacillo de cabuya “nuevo”.	32
Figura 4.1.2 Drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #50 utilizando bagacillo de cabuya “usado”.	32
Figura 4.1.3 Drenabilidad en función del porcentaje de diferencia de humedad para el tamaño de partícula retenido en la malla #50 utilizando bagacillo de cabuya “usado”.	33
Figura 4.1.4 Drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #20 utilizando bagacillo de cabuya “nuevo”.	34
Figura 4.1.5 Drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #20 utilizando bagacillo de cabuya “usado”.	34
Figura 4.1.6 Drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #8 utilizando bagacillo de cabuya “nuevo”.	35
Figura 4.2.1 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #50.	38
Figura 4.2.2 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #20.	39

Figura 4.2.3 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración al vacío utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.	41
Figura 4.2.4 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración al vacío utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.	42
Figura 4.2.5 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #8.	43
Figura 4.2.6 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #20.	43
Figura 4.2.7 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #50.	44
Figura 4.2.8 Gráfico de probabilidad normal para la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya de malla #50.	45
Figura 4.2.9 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica corregido utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #50.	46
Figura 4.2.10 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.	47
Figura 4.2.11 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.	47
Figura 4.2.12 Gráfico de probabilidad normal para la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya de malla #50 utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante.	48
Figura 4.2.13 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica corregida utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.	49
Figura 4.2.14 Gráfico de probabilidad normal para la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya de malla #50 utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante.	50
Figura 4.2.15 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica corregida utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.	50

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 3.2.1 Equipo experimental.	29
Cuadro 4.1 Resultados de las pruebas de caracterización del bagacillo de cabuya de mallas: #8, #20 y #50.	36
Cuadro 4.2 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya de mallas 8, 20 y 50.	39
Cuadro 4.3 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya de mallas 8, 20 y 50.	46
Cuadro 4.4 Datos de resistencia específica y resistencia del medio filtrante para la filtración a presión atmosférica en malla #50 sin floculante y con floculante.	51
Cuadro A.1 Dimensiones de los porómetros.	59
Cuadro A.2 Datos obtenidos de drenabilidad, humedad y peso de las muestras para el cálculo de la porosidad y densidad aparente del bagacillo de cabuya malla # 8.	59
Cuadro A.3 Datos obtenidos de drenabilidad, humedad y peso de las muestras para el cálculo de la porosidad y densidad aparente del bagacillo de cabuya malla # 20.	59
Cuadro A.4 Datos obtenidos de drenabilidad, humedad y peso de las muestras para el cálculo de la porosidad y densidad aparente del bagacillo de cabuya malla # 50.	60
Cuadro A.5 Datos obtenidos para el cálculo del peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #8.	60
Cuadro A.6 Datos obtenidos para el cálculo del peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #20.	60
Cuadro A.7 Datos obtenidos para el cálculo del peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #50.	61
Cuadro A.8 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración al vacío.	61
Cuadro A.9 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 8.	61

Cuadro A.10 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 20.	61
Cuadro A.11 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 50.	61
Cuadro A.12 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración al vacío, utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.	62
Cuadro A.13 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración al vacío, utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.	62
Cuadro A.14 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración al vacío, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.	62
Cuadro A.15 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración al vacío, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.	62
Cuadro A.16 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 8.	62
Cuadro A.17 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 20.	62
Cuadro A.18 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 50.	63
Cuadro A.19 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 8.	63
Cuadro A.20 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 20.	63
Cuadro A.21 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 50.	63
Cuadro A.22 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración a presión atmosférica, utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.	63
Cuadro A.23 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración a presión atmosférica, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.	63

Cuadro A.24 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración a presión atmosférica, utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.	64
Cuadro A.25 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración a presión atmosférica, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.	64
Cuadro A.26 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 20.	64
Cuadro A.27 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 50.	64
Cuadro A.28 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 50, agregando 0,5 ml de floculante + 15 ml de coagulante.	65
Cuadro A.29 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 50, agregando 1 ml de floculante + 15 ml de coagulante.	65
Cuadro A.30 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 50.	65
Cuadro A.31 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 20.	65
Cuadro A.32 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 8.	66
Cuadro A.33 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 50, agregando 0,5 ml de floculante + 15 ml de coagulante.	66
Cuadro A.34 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 50, agregando 1 ml de floculante + 15 ml de coagulante.	67
Cuadro A.35 Datos obtenidos de las aguas residuales para el cálculo de la resistencia específica y del medio filtrante para la filtración a presión atmosférica, utilizando bagacillo de cabuya #50.	67
Cuadro A.36 Datos obtenidos de las aguas residuales para el cálculo de la resistencia específica y del medio filtrante para la filtración a presión atmosférica, con floculante y coagulante utilizando bagacillo de cabuya #50.	68
Cuadro B.1 Volumen de los porómetros.	69

Cuadro B.2 Porosidad y densidad aparente para el bagacillo de cabuya de malla tipo #8.	69
Cuadro B.3 Porosidad y densidad aparente para el bagacillo de cabuya de malla tipo #20.	69
Cuadro B.4 Porosidad y densidad aparente para el bagacillo de cabuya de malla tipo #50.	70
Cuadro B.5 Peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #8.	70
Cuadro B.6 Peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #20.	70
Cuadro B.7 Peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #50.	70
Cuadro B.8 Cálculo del promedio, desviación y varianza de la drenabilidad, porosidad, densidad y peso específico del bagacillo de cabuya de tipo de malla #8.	71
Cuadro B.9 Cálculo del promedio, desviación y varianza de la drenabilidad, porosidad, densidad y peso específico del bagacillo de cabuya de tipo de malla #20.	71
Cuadro B.10 Cálculo del promedio, desviación y varianza de la drenabilidad, porosidad, densidad y peso específico del bagacillo de cabuya de tipo de malla #50.	71
Cuadro B.11 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya de mallas 8, 20 y 50.	72
Cuadro B.12 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya de mallas 8, 20 y 50.	72
Cuadro B.13 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración al vacío y a presión atmosférica utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante, utilizando bagacillo de cabuya malla # 50.	72
Cuadro B.14 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración al vacío y a presión atmosférica utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante, utilizando bagacillo de cabuya malla # 50.	72
Cuadro B.15 Datos de resistencia específica y resistencia del medio filtrante, para la filtración a presión atmosférica, utilizando bagacillo de cabuya malla # 50.	73

Cuadro B.16 Datos de resistencia específica y resistencia del medio filtrante, para la filtración a presión atmosférica, utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante en bagacillo de cabuya malla # 50.	73
Cuadro B.17 Datos de resistencia específica y resistencia del medio filtrante, para la filtración a presión atmosférica, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante en bagacillo de cabuya malla # 50.	73
Cuadro B.18 Datos obtenidos para la elaboración del gráfico de probabilidad normal en la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya malla #50.	73
Cuadro B.19 Datos obtenidos para la elaboración del gráfico de probabilidad normal en la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya malla #50 utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante.	74
Cuadro B.20 Datos obtenidos para la elaboración del gráfico de probabilidad normal en la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya malla #50 utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante.	74

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, en Costa Rica se ha utilizado la cabuya como fuente de materia prima para la elaboración de distintos materiales tales como: empaques, hilos, telas, sacos para la exportación de café y cacao, mecates y otros artículos. La zona de San Cristóbal de Desamparados, específicamente en la Finca La Lucha se localiza la mayor siembra comercial de la cabuya, de ésta planta se obtiene la fibra, la cual es extraída con una máquina desfibradora que tritura la hoja liberando la fibra del tejido esponjoso.

Según Robles (2010), el precio de la fibra seca libre de enredos y empacada es de 455 colones el kg, cuyo rendimiento en 100 kg de hojas únicamente 4 kg es de fibra seca, el resto es desechado como desperdicio y se le conoce como “bagacillo”.

La asociación de cabuteros ha tenido que descartar parte de la producción del cultivo debido a los precios tan bajos de demanda y a la sustitución de los sacos por material plástico por lo que se han visto obligados a descartar este producto para fortalecer otros cultivos, según Robles (2010), la producción en el 2009 fue de 96.000 kg, sin embargo tienen programado para este 2010 importar 30.000 kg de cabuya para abastecer su demanda, considerando la gran cantidad de desecho que se genera al desfibrar, es que se propone como posible aplicación, determinar las propiedades filtrantes de lechos contruidos a partir de bagacillo de cabuya utilizando éstos en aguas residuales. Este proyecto pretende darle un valor agregado al bagacillo que se está desechando y a la vez minimizar los desechos sólidos que este cultivo genera.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Furcraea Cabuya

Según Chávez (1998), la cabuya (*Furcraea cabuya*) es una planta monocotiledónea, perteneciente al orden Liliales a la familia agavaceae y al género *furcraea*, es originaria de la América Tropical. Se conoce como agave, fibra de aloe, fique, penca, cabui, chichau y otros.

Esta planta responde al nombre genérico de *Furcraea* cuyos sinónimos *furcroya* (“*Furcraea*”), fueron creados por el naturalista Etienne Pierre Ventanat en 1793, en homenaje al conde Antoine Furcroy, químico del jardín real de París. En consecuencia, la cabuya pertenece al grupo de las *furcroyas*, clasificadas al igual que los ágaves en la familia de las *Amaryllidaceas*, pero se distingue de estos por que las hojas no terminan en fuertes espinas córneas sino en diminutos agujones y las flores de color amarillo claro, se encuentran dispersas en las ramas de la inflorescencia, mientras que en los ágaves, permanecen agrupados en ramilletes enhiestos conspicuamente ordenados [Gómez, 1988].

La cabuya es un cultivo que tradicionalmente y por más de 55 años se ha cultivado en forma extensiva, adaptándose a suelos de un escaso potencial agrícola que, sin embargo, proporciona al agricultor un cierto ingreso económico, no obstante, la carencia de estímulos a este productor como marco de apoyo institucional, ha hecho que el cultivo no tenga la productividad y rentabilidad deseada. La fibra natural compite con la fibra sintética, siendo ésta de más bajo costo, pero su uso es limitado para la exportación de café, en virtud de que este producto se conserva mejor empacado en sacos de fibra natural, además de que es más resistente y de más fácil manejo a la hora de estibar el producto [Soto, 1985]

Las fibras de cabuya se emplean para producir mecates y artesanía, las raíces para obtener una infusión depurativa y el jugo de las hojas se utiliza para blanquear ropa y producir bebidas alcohólicas, además es una planta regeneradora de suelos [Arias, 1998].

En el contexto internacional, las fibras naturales recuperan espacio en el mercado mundial como insumos ventajosos en sostenibilidad y protección del ambiente, precisamente los intereses o preferencias ambientales de la sociedad están creando un nuevo concepto de mercadeo global, con énfasis en disminuir el deterioro del planeta, e innovar las tecnologías de cultivo, procesamiento y aplicación [Aguilar, 2007].

2.2 Características taxonómicas de la Cabuya

2.2.1 Descripción botánica

La cabuya es una hierba gigantesca, formada por un tallo central sin ramificación, hasta de metro y medio de alto, cubierto por un centenar o más de hojas largas y suculentas. El follaje se forma en el ápice del tallo; las hojas nuevas permanecen juntas y se desarrollan en la parte superior de la planta. Las hojas interiores son cortas, las centrales más largas y las que produce la planta al final de su vida son las de menor tamaño. Del ápice del tallo crece, después de varios años, un vástago florífero, al desarrollarse las flores y frutas, la planta inicia su decadencia y muere algunos meses después. El tallo central es cilíndrico en la base, cónico hacia el ápice y esta cubierto por la base de las hojas o en los lugares expuestos por una epidermis dura. Cuando la planta alcanza la madurez, aparece por el centro de las hojas el escapo floral, un tallo cilíndrico, de entre nudos largos, que lleva hojas cortas y triangulares, con el ápice espinudo. Crece de cinco a seis metros de alto y se ramifica desde la base. En las plantas cultivadas, en las que las hojas, son cortadas a menudo, la ramificación del escapo floral se presenta sólo en el extremo del tallo [Chávez, 1998].

Las ramas primarias del vástago florífero llevan numerosas ramillas que crecen horizontalmente y se dividen varias veces de tres en tres, al final de éstas divisiones crecen las flores. La flor tiene el perianto amarillento o verdoso, de seis partes unidas en la base en un tubo y libres arriba. Las hojas son el principal medio de almacenamiento de agua y sustancias nutritivas. Están colocadas siguiendo varias espirales, de modo que entre una hoja y la que está colocada en la misma línea vertical, arriba o abajo, hay varias hojas intermedias. El color de la lámina es verde, algunas veces son áreas longitudinales de diferentes tonos, las hojas vistas por el lado superior son lanceoladas, con un cuello angosto hacia la base, de bordes casi paralelos en la parte central y que

terminan en un aguijón cónico y duro. La longitud de la hoja varía, desde 20 cm a 2 m, con un promedio de 1 m a 1,2 m, la anchura fluctúa entre 7 cm y 15 cm. En el parénquima lagunoso, se encuentran las fibras mecánicas, éstas fibras se hallan también en el centro de la hoja pero son más abundantes hacia la periferia, en ambos lados corren en toda la longitud de la lámina y constituyen su principal soporte. Éstas fibras son las más resistentes, pues no se rompen al extraerlas y de su número y peso depende del rendimiento [Chávez, 1998].

2.2.2 Características de la fibra de la Cabuya

Su rendimiento oscila entre 1,5% y 3,5 % del peso total de las hojas verdes. Cada fibra se compone de 90 cm a 2,25 m de longitud, por 0,8 mm a 0,5 mm de diámetro, de forma angular o casi cilíndrica, más gruesa en la base de un color que va del blanco al amarillento, el contenido de celulosa de la fibra está entre 73-76% aproximadamente, la resistencia mecánica es de 30.000 a 32.000 gramos por ramo metro (para esta determinación, se divide la resistencia de cada hebra por el peso medio de cada metro de las hebras que se analizan) [Gómez, 1988].

2.2.3 Duración de la plantación

La duración de la Cabuya es muy variable debido a que se encuentra influenciada por factores internos y externos, pero se puede dar como promedio de 25 a 30 años bajo condiciones normales, sin embargo existen muchas plantas que después de 40 años de vida se encuentran produciendo, cosechas y todavía no dan muestras de finalizar su período vegetativo [Gómez, 1988].

La época de corta es determinada por varios factores, uno de ellos es la inclinación que toman las hojas maduras con respecto al eje central o tallo, pues cuando está de corta presenta un ángulo agudo, en cambio una vez adquirida la madurez, la hoja va descendiendo paulatinamente hasta adquirir a veces ángulos cercanos a los 90° [Izquierdo, 1979].

Es importante desde el punto de vista industrial y económico determinar la época óptima de corta, ya que si ésta se verifica antes de tiempo, la calidad de la fibra será

inferior y la producción más baja de lo normal, mientras que si las hojas se pasan de madurez, el tejido parenquimatoso comienza a descomponerse y las fermentaciones que se desarrollan manchan la fibra y en caso extremo la deterioran. Cuando el cabuyal esta de corta, el número de hojas que posee cada planta oscila de 26 a 36, de tal manera que al efectuar la corta, se deben dejar unas catorce hojas a cada planta para que con ellas prosiga realizando sin interrupción marcada, su trabajo fotosintético que irá a dar como resultado la próxima cosecha [Gómez, 1988].

2.2.4 Clima y suelo

Según Gómez (1988), la cabuya crece desde las llanuras costaneras hasta las regiones situadas casi a los 3.000 metros de altura, los límites óptimos de temperatura están entre los 18 °C y 24 °C a menos de 17 °C el desarrollo de la planta es muy lento, la fibra es menos resistente y el número de hojas es escaso. En regiones con temperaturas superiores a 24 °C tiene desarrollo rápido, pero el porcentaje de fibra y la longevidad de la planta son menores. Una humedad relativa del 50% al 70% es ideal, puede prosperar en regiones con precipitaciones anuales en promedio de 500 mm a 750 mm, pero también con lluvias de 1000 mm a 2500 mm anuales, sin embargo en regiones demasiado lluviosas la fibra no es de buena calidad, la precipitación óptima está entre 300 mm a 1300 mm anuales.

La planta exige una buena luminosidad de 5 a 6 horas diarias de sol como promedio anual, aunque puede tolerar la sombra de los árboles. En algunos países de América Tropical, se recomienda para programas de conservación de suelos, alternar ésta con gramíneas o con otros cultivos como café y plátano.

2.3 Filtración

Se denomina filtración la operación unitaria mediante el cual separamos un sólido de un fluido, un líquido o un gas. Durante la operación de un filtro, los sólidos son retenidos por el medio filtrante obteniéndose un fluido hasta cierto grado exento de sólidos, dependiendo esto de las características del filtro. La mezcla a separar se llama lodo, el producto que pasa el filtro se llama filtrado y lo que retiene los sólidos se llama medio filtrante, cuando los sólidos separados se depositan sobre el medio filtrante en

cantidades apreciables y visibles entonces éstos sólidos se llaman la torta o queque. El equipo que incluye un dispositivo para el medio filtrante, cámara para deposición de la torta, espacio para el lodo, superficie de drenaje y canales para el filtrado se llama filtro [Navarro, 1968].

Teóricamente se puede usar la filtración para cualquier tipo de separación sólido-fluido, pero en la práctica solo se usa para concentraciones intermedias, siendo la filtración sustituida para concentraciones bajas o bien altas por otras operaciones tales como centrifugación, sedimentación, decantación, etc...

2.3.1 Tipos de filtración de acuerdo a las características del medio filtrante

Según Gamboa (1985), la porosidad del medio filtrante provocará que en algunas ocasiones el filtrado se produzca en la parte superior del filtro, lo cual se conoce como “filtración superficial” o durante el recorrido del fluido a través del medio filtrante, conocido este tipo como “filtración sobre lecho filtrante”

2.3.1.1 Filtración superficial

Este tipo de filtración ocurre cuando las materias en suspensión que se deben separar tienen una dimensión superior a los poros, quedando retenidas en la superficie del filtro. La filtración superficial según las condiciones impuestas, pueden efectuarse sobre un soporte de mallas, un soporte grueso o un soporte con precava.

2.3.1.2 Filtración sobre lecho filtrante

Esta filtración se utiliza cuando la cantidad de sólidos que deben de retenerse es grande y la dimensión de las partículas contenidas en el fluido es relativamente pequeño. Para que una filtración de este tipo sea eficaz es preciso que las impurezas puedan penetrar profundamente dentro del lecho, sin bloquearlo en la superficie, a medida que aumenta la cantidad de sólidos retenidos en el lecho del filtro, la eficiencia de ésta se reduce, obstruyéndose el paso del fluido y disminuyéndose la calidad del filtrado.

Si el grado de obstrucción alcanza un valor excesivo o la calidad del filtrado no es aceptable, debe procederse al lavado del lecho filtrante, cuyo objetivo es devolver al

filtro sus cualidades iniciales, en caso de que el lecho filtrante se encuentre muy deteriorado para poder cumplir las funciones requeridas, será necesario su reemplazo. La elección entre filtración superficial y filtración sobre lecho filtrante depende de diversos criterios:

- Las características del fluido a filtrar y sus impurezas.
- La calidad del filtrado que debe obtenerse y tolerancias permisibles.
- La calidad del aglomerado de los sólidos retenidos, si se tiene como fin su recuperación.
- Las condiciones de instalación.
- Las posibilidades y medios disponibles para el lavado.

2.3.2 Tipos de filtración de acuerdo al comportamiento de la presión durante el proceso

Según Gamboa (1985), la presión en los procesos de filtración es una variable relativamente fácil de controlar, de esta manera e independientemente del tipo del lecho filtrante, es posible realizar la filtración a presión constante, velocidad constante o régimen mixto.

2.3.2.1 Filtración a presión constante

Ésta se acostumbra realizar cuando se filtra un líquido turbio que forma una torta apenas sensible a la presión, en este caso la velocidad de flujo es máxima al comienzo de la filtración y disminuye continuamente hasta el final a causa de la obstrucción del medio filtrante.

2.3.2.2 Filtración a velocidad constante

Se emplea cuando el precipitado está constituido, total o parcialmente por sustancias sensibles a la presión, si se trabaja en éste régimen, la caída de presión de entrada comienza con un valor pequeño que va aumentando a lo largo de la operación ya sea progresivamente o por etapas, para alcanzar un máximo al final.

2.3.2.3 Régimen mixto

Combinación de los dos métodos anteriores, reduce la pérdida de sólidos a través del medio filtrante cuando la resistencia es baja y evita que los sólidos se incrusten en el medio, se comienza a velocidad constante hasta que la presión de entrada alcance un valor máximo determinado y luego se continúa a presión constante hasta el final de la filtración.

2.3.3 Clasificación de los filtros por fuerza motriz aplicada o fuerza impulsora

Según Navarro (1968), la clasificación por fuerza motriz comprende los siguientes tipos a saber:

2.3.3.1 Filtración por gravedad

En este tipo de filtro el filtrado fluye a través del medio filtrante, debido a la presión hidrostática que provoca el lodo sobre la membrana filtrante. El tipo de filtro de gravedad constituye el tipo más sencillo y antiguo, ejemplo de este tipo de filtro son los filtros de arena usados en la purificación del agua de consumo humano, estando este tipo de filtro constituido por un fondo perforado, llenándose parcialmente el depósito superior de arena porosa, a través de la cual pasará el filtrado.

Se pueden señalar como ventajas de los filtros de gravedad las siguientes:

- Simplicidad, ya que su construcción es simple no requiriendo equipo especial refinado.
- Depende de accesorios simples, ya que al no requerir equipo especial no requerirá instrumentación.
- Bajo costo de construcción.
- Factibilidad de construcción de cualquier material tal como fondo de cemento o acero y rellenos de arena, carbón, etc.
- Implícita en su disposición ésta la ventaja de cualquier superficie filtrante horizontal, donde las partículas sedimentarán rápidamente y con una distribución donde las partículas mayores se depositarán primero, produciéndose así un fácil lavado.

Como desventaja de este tipo de filtración se puede enumerar:

- Velocidad de filtración baja ya que no tiene ningún medio que induzca la filtración a no ser la fuerza hidrostática.
- El espacio ocupado es muy grande, ya que el área de filtración requerida es grande, debido a la velocidad de filtración baja.
- Costos laborales altos, ya que cuando requieren mantenimiento y al ser su área de filtración muy grande, su costo es alto.
- Pérdida de parte de la cama porosa de filtración al efectuarse el mantenimiento.

2.3.3.2 Filtración por presión

En este tipo de separadores sólido-fluido el líquido fluye a través de la membrana debido a una presión superatmosférica, suministrada por algún medio mecánico.

Algunas ventajas de este tipo de filtro son:

- Velocidad de filtración alta, debido a las presiones aplicadas.
- Su área de filtración es relativamente grande con respecto al espacio ocupado.
- Gran flexibilidad de variación de los materiales a filtrar, a un costo relativamente bajo.

Como desventaja de este tipo de filtro están:

- Los filtros de presión no son fácilmente aplicables a un proceso continuo.
- Los filtros de presión continuos no tienen flexibilidad y sus costos de operación son relativamente altos.

2.3.3.3 Filtración por vacío

En este caso el fluido fluye debido a una presión subatmosférica, teniendo este tipo de filtros las siguientes ventajas son:

- Se pueden diseñar filtros al vacío continuos eficientes.
- Su operación no necesita mucha mano de obra.
- Su superficie filtrante está abierta a la atmósfera y por lo tanto es fácilmente accesible al mantenimiento rápido, así como para la inspección y separación de la torta.

Como desventaja de este tipo de filtro se apuntan:

- Debe mantenerse un vacío, lo que hace esto una dificultad de diseño.
- No se pueden utilizar temperaturas altas o bien fluidos volátiles ya que se produciría la ebullición de éstos.
- No son recomendables para sólidos compresibles, ya que dificulta la filtración sobre manera, pudiéndose salvar esta dificultad en parte mediante adición de un filtro ayuda, pero esto encarecerá la operación a llevar a cabo.
- No son flexibles ya que no trabajan bien con la variación de alguna característica de lodo a filtrar.

2.3.3.4 Filtración por centrifugación

Este es otro tipo de separador sólido-líquido clasificado de acuerdo con la fuerza motriz, tiene como ventajas:

- Alta área de filtración relativa.
- Gran velocidad de filtración con respecto al espacio ocupado.

2.3.4 Clasificación de filtros según método de separación

2.3.4.1 Filtros de presión discontinuos

Los filtros de presión utilizan una gran presión diferencial a través del medio filtrante para lograr una filtración rápida muy económica con líquidos viscosos o con sólidos finos, los tipos más comunes de filtros a presión son los filtros prensa y los filtros de carcasa y hojas [Mc Cabe, 2002].

- *Filtro prensa*: Un filtro prensa contiene un conjunto de placas diseñadas para proporcionar una serie de cámaras o compartimentos en los que se pueden recoger los sólidos, las placas se recubren con un medio filtrante tal como una lona, la suspensión se introduce en cada compartimiento bajo presión; el líquido pasa a través de la lona y sale a través de una tubería de descarga, dejando detrás una torta de sólidos húmeda. Una vez instalado el filtro prensa, se introduce la suspensión por medio de una bomba o tanque presurizado generalmente a una presión de 3 a 10 atmósferas, la filtración continúa hasta que ya no sale líquido por el tubo de descarga o bien aumenta bruscamente la presión de filtración [Mc Cabe, 2002].

Los filtros prensa se usan en los procesos por lotes pero no se pueden emplear para procesos de alto rendimiento. Se manejan con facilidad, son versátiles y de operación flexible y se pueden utilizar a altas presiones si es necesario, con soluciones viscosas o cuando la torta de filtro tiene una gran resistencia [Geankopolis, 1998].

- *Filtros de carcasa y hojas:* El filtro prensa es útil para muchos propósitos pero no es económico para el manejo de grandes cantidades de lodos, ni para el lavado eficiente con cantidades pequeñas de agua. El agua de lavado suele formar canales en las tortas y se requieren grandes volúmenes de líquido. El filtro de hojas se acondiciona para grandes volúmenes de suspensión y un lavado más eficiente. Cada hoja es un marco hueco de alambre cubierto con un saco de tela filtrante. Estas hojas se cuelgan en paralelo en un tanque cerrado. La suspensión entra al tanque y la presión llega a la tela filtrante, donde la torta se deposita en el exterior de la hoja. El filtrado fluye por el interior del marco hueco hacia un cabezal de descarga y el líquido de lavado sigue la misma trayectoria de la suspensión. De esta forma, el lavado resulta más eficiente que en los filtros prensa. Los filtros de hoja presentan la desventaja de la operación por lotes. Se pueden automatizar para el ciclo de filtración, lavado y limpieza, pero su funcionamiento es cíclico, por lo cual se usan para procesos por lotes y de producción relativamente modesta [Geankopolis, 1998].
- *Filtros discontinuos a vacío:* Por lo general, los filtros a presión son discontinuos, mientras que los de vacío son continuos, sin embargo, un filtro discontinuo a vacío resulta a veces muy útil, una nutcha de vacío es poco más pequeña que un embudo Büchner grande de 1 m a 3 m de diámetro y en ella se forma una capa de sólidos de 100 mm a 300 mm de espesor. Debido a su sencillez, una nutcha se construye con facilidad con materiales resistentes a la corrosión y resulta valiosa cuando han de filtrarse cargas experimentales de una gran variedad de materiales corrosivos. Las nutchas son poco comunes en procesos a gran escala debido a la labor que se desarrolla en la extracción de la torta; sin embargo son útiles como filtros a presión en algunas operaciones discontinuas en las cuales la torta debe ser secada en el filtro antes de la descarga [Mc Cabe, 2002].

2.3.4.2 Filtros continuos a vacío

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 de 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 [Mc Cabe, 2002].

Según Geankopolis (1998), los filtros prensa y los de hojas tienen las desventajas típicas de los procesos intermitentes y no se pueden usar para procesos de gran capacidad. Existen varios filtros de tipo continuo disponibles, los cuales se analizan en seguida:

- *Filtro rotatorio continuo de tambor al vacío*: El filtro rotatorio continuo al vacío filtra, lava y descarga la torta con un régimen continuo. El tambor cilíndrico se recubre de un medio filtrante adecuado, se hace girar, y una válvula automática en el centro sirve para activar las funciones de filtrado, secado, lavado y descarga de la torta del ciclo de operación. El filtrado sale por el eje del filtro. La válvula automática permite la salida independiente del filtrado y líquido de lavado. Además, cuando es necesario, se puede usar una conexión para un retrosoplado de aire comprimido poco antes de la descarga, para ayudara que el raspador de cuchilla desprenda la torta. El diferencial máximo de presión para el filtro al vacío es de sólo 100 kPa. por consiguiente, este modelo no es adecuado para líquidos viscosos o líquidos que deben estar encerrados. Si el tambor se encierra en una coraza, se pueden usar presiones superiores a la atmosférica. Sin embargo, el costo de un equipo de presión es de cerca del doble del de un filtro rotatorio de tambor al vacío.
- *Filtro de disco rotatorio continuo*: Este filtro consta de discos verticales concéntricos montados en un eje horizontal rotatorio. El filtro opera con el mismo principio que el filtro rotatorio de tambor al vacío. Todos los discos están huecos y cubiertos con un filtro de tela que se sumerge parcialmente en la suspensión. La torta se lava, se seca y se descarga raspándola cuando el disco está en la sección

superior de su rotación. El lavado es menos eficiente que con el filtro de tambor rotatorio.

- *Filtro horizontal rotatorio continuo*: Éste es un filtro al vacío cuya superficie filtradora anular rotatoria está dividida en sectores. Conforme el filtro horizontal gira recibe suspensión, luego se lava, se seca y se le quita la torta. La eficiencia del lavado es mejor que con el filtro de disco rotatorio. Se usa mucho en procesos de extracción de minerales, lavado de pulpas y otros procesos de gran capacidad.

2.3.4.3 Variables que intervienen en la elección del filtro

Según Gamboa (1985), la elección del tipo de filtro más apropiado a cada caso no es un problema sencillo, intervienen en esta decisión variables tales como:

- Área efectiva del filtro.
- Caída de presión a través del filtro.
- Resistencia del medio filtrante al flujo del fluido.
- Efecto de dilatación del solvente sobre el medio filtrante.
- Compresibilidad del medio filtrante bajo la presión del fluido.
- Tamaño de partículas suspendidas.
- Tendencia de las partículas a flocular.
- Viscosidad del lodo.
- Temperatura del lodo.
- Velocidad de formación de la torta.
- Resistencia de la torta del filtro al flujo del fluido.
- Consistencia del lodo.

2.3.5 Medios filtrantes

El medio filtrante lo conforman los poros, fibras o sustancias granulares a través del cual el fluido debe pasar, el número de medios que han sido empleados para la filtración es grande, algunos de éstos son: papel y pulpa de papel, fibras vegetales, asbestos, arena, grava, precipitados, lana, seda, pelo, lino, platos perforados, piedras porosas, paja, etc [Gamboa, 1985].

Algunos estudiosos en la materia dividen los medios filtrantes en cuatro clases:

1. Lechos entreteljidos o de material afelpado: papel de filtro, filtro, algodón, tejido de lana o tela de lino y cedazo de alambre.
2. Medios fibrosos no tejidos: Algodón, lana, fibra de lino, fibra de asbestos, pulpa de papel y esponja.
3. Lechos granulares o polvoreados: grava, tierra, tierra de diatomita, metal polvoreado, carbón, arena, corcho y aserrín.
4. Platos porosos: platos perforados artificialmente, de metal o de caucho, platos perforados naturalmente, de carbón, piedra o porcelana.

2.3.5.1 Selección del medio filtrante

Según Navarro (1968), la selección de un buen medio filtrante se hace con base a la mejor satisfacción de las siguientes condiciones:

- Habilidad para puntear sólidos a través de sus poros en un tiempo razonable después de iniciada la filtración.
- Resistencia mínima al flujo de filtrado.
- Que no permita la obstrucción de sus poros.
- Suficiente fortaleza y consistencia para resistir la presión filtrante y el manejo de los sólidos depositados en la torta.
- Resistencia química y prevención de contaminantes.
- Resistencia mecánica como por ejemplo la abrasión.
- Mejor balance económico de costos de inversión y mantenimiento.

2.3.6 Coadyuvantes de filtración

En algunos casos se usan ayudas de filtración para acelerar el proceso. Por lo general, son tierras diatomáceas o kieselguhr, que están constituidos principalmente por sílice no compresible. También se usa celulosa de madera, asbesto y otros sólidos porosos inertes. Estas ayudas de filtración se pueden usar de diferentes maneras; por ejemplo como recubrimiento previo antes de filtrar la suspensión, el cual impide que los sólidos de tipo gelatinoso obstruyan el medio filtrante y permite obtener un filtrado más transparente. También se pueden añadir a la suspensión antes de la filtración. Esto

aumenta la porosidad de la torta y reduce su resistencia durante el proceso. En un filtro rotatorio, la ayuda de filtración se puede aplicar como recubrimiento previo y durante la operación se desprende junto con la torta. El uso de ayudas de filtración suele estar limitado a los casos en que la torta es el material que se descarta, o cuando el precipitado se puede separar de ellas por medios químicos [Geankopolis, 1998].

2.3.7 Fundamentos de filtración

En la filtración, las resistencias al flujo aumentan con el tiempo a medida que el medio filtrante se va obstruyendo o se forma una torta de filtración, las principales magnitudes de interés son la velocidad de flujo a través del filtro y la caída de presión en la unidad. A medida que transcurre el proceso de filtración o bien disminuye la velocidad de flujo o aumenta la caída de presión, en la llamada filtración a presión constante, la caída de presión permanece constante y la velocidad de flujo va disminuyendo con el tiempo; es menos frecuente que la caída de presión aumente progresivamente para dar lugar a la llamada filtración a velocidad constante [Mc Cabe, 2002].

En la filtración de torta, el líquido pasa a través de dos resistencias en serie: la de la torta y la del medio filtrante, la resistencia del medio filtrante, que es la única resistencia en los filtros clarificadores, normalmente solo es importante durante las primeras etapas de la filtración de la torta, la resistencia de la torta es nula al principio y aumenta con el tiempo a medida que transcurre la filtración, si la torta se lava después de la filtración, ambas resistencias son constantes durante el período de lavado y la del medio filtrante por lo general es despreciable. La caída global de presión en un instante cualquiera es la suma de las caídas de presión en el medio filtrante y en la torta. Si P_a es la presión en la entrada, P_b la presión en la salida y P' la presión en el límite de separación entre el medio filtrante y la torta, entonces:

$$\Delta P = P_a - P_b = (P_a - P') + (P' - P_b) = \Delta P_c + \Delta P_m \quad (2.1)$$

Donde:

ΔP = Caída de presión global.

ΔP_c = Caída de presión en la torta.

ΔP_m = Caída de presión en el medio filtrante.

2.3.7.1 Resistencia específica de la torta

La resistencia específica de la torta se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\Delta P_c A}{\mu u m_c} \quad (2.2)$$

Donde:

μ = Viscosidad del filtrado.

u = Velocidad lineal del filtrado basado en el área del filtro.

A = área del filtro.

m_c = masa total de sólidos en la torta.

α = Resistencia específica de la torta.

La resistencia específica de la torta está influida por las propiedades físicas de la torta, en especial el tamaño de la partícula D_p y la porosidad ϵ . Para tortas incompresibles, α es independiente de la caída de presión y de la posición en la torta. [Mc Cabe, 2002].

2.3.7.2 Resistencia del medio filtrante

Según Mc Cabe (2002), la resistencia del medio filtrante R_m se define por analogía con la resistencia de la torta $\alpha m_c/A$. La ecuación es:

$$R_m = \frac{P' - P_b}{\mu u} = \frac{\Delta P_m}{\mu u} \quad (2.3)$$

La resistencia del medio filtrante R_m varía con la caída de presión, debido a que la velocidad del líquido más alta causada por una caída de presión hace que las partículas adicionales de sólidos penetren en el medio filtrante, pero cómo solo es importante durante las primeras etapas de la filtración y obtener su valor a partir de datos experimentales. Cuando R_m se trata como una constante empírica, incluye también cualquier resistencia al flujo que pudiera existir en las líneas de acceso y salida del filtro.

Sustituyendo las ecuaciones (2.2) y (2.3) en (2.1) se obtiene:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m = \mu u \left(\frac{m_c \alpha}{A} + R_m \right) \quad (2.4)$$

Al utilizar la ecuación (2.4) es conveniente sustituir u , la velocidad lineal del filtrado y m_c , la masa total de sólido en la torta, por funciones del volumen total de filtrado recogido durante el tiempo t . [Mc Cabe, 2002].

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A\Delta P} \left(\frac{\alpha_c V}{A} + R_m \right) \quad (2.5)$$

Donde:

c como subíndice de α_c = es la masa de partículas depositada en el filtro por unidad de volumen de filtrado.

2.3.7.3 Filtración a presión constante

Cuando ΔP es constante, las únicas variables en la ecuación (2.5) son V y t , cuando $t = 0$, $V = 0$ y $\Delta P = \Delta P_m$ se tiene:

$$\frac{\mu R_m}{A\Delta P} = \left(\frac{dt}{dV} \right)_0 = \frac{1}{q_0} \quad (2.6)$$

La ecuación (2.6) puede escribirse así:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{1}{q} = K_c V + \frac{1}{q_0} \quad (2.7)$$

Donde:

$$K_c = \frac{\mu c \alpha}{A^2 \Delta P} \quad (2.8)$$

La integración de la ecuación (2.7) entre los límites (0,0) y (t, V) da:

$$\frac{t}{V} = \left(\frac{K_c}{2} \right) V + \frac{1}{q_0} \quad (2.9)$$

Por tanto, una representación gráfica de t/V frente a V será una línea recta de pendiente $K_c/2$ y ordenada en el origen $1/q_0$, a partir de una representación gráfica y de las ecuaciones (2.6) y (2.8) se calculan los valores de α y R_m [Mc Cabe, 2002].

2.4 Aguas Residuales

Según el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales, decreto ejecutivo # 33601 (2007), se define como agua residual el agua que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes. El reglamento divide el agua en dos tipos según su origen:

- Agua residual de tipo ordinario: agua residual generada por las actividades domésticas del hombre (uso de inodoros, duchas, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa, etcétera).
- Agua residual de tipo especial: agua residual de tipo diferente al ordinario.

2.4.1 Técnicas de muestreo

Para definir las técnicas de muestreo a utilizar en determinado análisis, se deben tener claros los objetivos o propósitos del estudio que se va a realizar. Las muestras pueden ser tomadas de manera manual o automática. La manera automática es con dispositivos que succionan el agua en el punto deseado en el momento programado [Lizano, 2003].

Los dos principales y más comúnmente utilizados tipos de muestreo son:

- Muestreo simple
- Muestreo compuesto

Algunas recomendaciones para lograr muestras representativas, aplicables a los dos tipos de muestreos:

- La muestra debe ser tomada en el sitio de mayor turbulencia
- Las partículas con diámetros mayores a los 6,3 mm deben ser eliminadas de la muestra siempre que eso se considere como no representativo de la muestra.
- Los depósitos no representativos de materiales flotantes o espumas acumuladas en los puntos de muestreo no deben ser considerados en la muestra, por lo que deben ser eliminados al tomar la muestra.
- Los volúmenes de las muestras varían según las pruebas que se van a realizar pero se recomienda un mínimo de 1 litro por muestra.
- Una vez tomada la muestra debe ser almacenada en una hielera hasta ser utilizada para los ensayos de laboratorio.
- A la hora de tomar la muestra se recomienda usar equipo personal adecuado (guantes, tapa boca, etcétera).

2.4.1.1. Muestreo simple

Según el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales, decreto ejecutivo # 33601 (2007), define este tipo de muestreo como aquella muestra tomada en un corto período, de tal forma que el tiempo empleado en su extracción sea el transcurrido para obtener el volumen necesario.

Se considera que un muestreo es representativo cuando se presenta una de las siguientes situaciones:

- La composición no varía con el tiempo.
- El volumen no varía con el tiempo.
- Presenta un flujo intermitente.
- Muestra condiciones extremas de pH o temperatura

El volumen más recomendado para este tipo de muestras es de 1 o 2 litros por muestra [Lizano, 2003].

2.4.1.2. Muestreo compuesto

Según el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales, decreto ejecutivo # 33601 (2007), define este tipo de muestreo como dos o más muestras simples que se han mezclado en proporciones conocidas y apropiadas para obtener un resultado promedio de sus características. Las proporciones se basan en mediciones de tiempo o de flujo.

Los muestreos compuestos se hacen, generalmente de una sucesión de muestras tomadas en un mismo sitio cada cierto tiempo, durante un intervalo de tiempo predeterminado. Los intervalos entre muestras y la duración total del muestreo varían y se ajustan dependiendo de las condiciones en situ. Sin embargo, si las condiciones lo permiten, se puede realizar un muestreo de 12 horas tomando una muestra por hora. Las condiciones para realizar un muestreo de 12 horas, como el que se describió anteriormente, es cuando el caudal y la concentración no varían repentinamente [Lizano, 2003].

2.4.2. Pruebas físicas y químicas

Para el análisis de la calidad del agua residual se deben analizar diferentes parámetros, estos se pueden dividir en parámetros físicos, químicos y microbiológicos. El reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales, establece en su cuerpo normativo, los parámetros físicos y químicos que son obligatorios para las aguas residuales, para este proyecto se realizarán como pruebas físicas: sólidos totales, sólidos sedimentables y turbidez y como prueba química se realizara la demanda química de oxígeno (DQO).

2.4.2.1. Turbidez

La transparencia del agua es importante para la elaboración de productos destinados a consumo humano y para numerosos usos industriales. Los fabricantes de bebidas, los procesadores de alimentos y el tratamiento de las plantas de extracción sobre agua superficial generalmente confían en la coagulación, la clasificación y el filtrado para garantizar productos aceptables. La transparencia de una masa natural de agua es un factor decisivo para la calidad y productividad de estos sistemas. La turbidez del agua es producida por materias en suspensión, como arcilla, cieno o materias orgánicas e inorgánicas finamente divididas, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros microorganismos [Water Pollution Control Federation, 1989].

La turbidez es una expresión de la propiedad óptica que origina que la luz se disperse y absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra. La correlación de la turbidez con la concentración en peso de la materia en suspensión es difícil de establecer, ya que en la dispersión luminosa también intervienen el tamaño, la forma y el índice de refracción de las partículas. Partículas ópticamente negras, como las de carbono activado, pueden absorber luz y aumentar significativamente las cifras de turbidez [Water Pollution Control Federation, 1989].

Históricamente el método para determinación de turbidez se basa en el turbidímetro de Jackson; sin embargo el valor más bajo de turbidez que puede medirse directamente con este instrumento es de 25 unidades, como la turbidez del agua tratada suele situarse en un intervalo de 0 a 1 unidades, también se desarrollaron métodos indirectos. Por desgracia ningún aparato puede duplicar los resultados obtenidos para todas las

muestras con el turbidímetro de Jackson. Debido a las diferencias fundamentales en el sistema óptico, los resultados obtenidos con distintos tipos de instrumentos secundarios a menudo no concuerdan exactamente aún cuando los aparatos estén precalibrados frente al turbidímetro de bujía [Water Pollution Control Federation, 1989].

Muchos de los turbidímetros comerciales disponibles para medida de turbidez baja proporcionan datos comparativamente válidos sobre la intensidad de la luz dispersada en una dirección dada, predominantemente en ángulo recto a la luz incidente. Éstos nefelómetros se ven escasamente afectados por las pequeñas variaciones de los parámetros de diseño y por tanto resultan especialmente útiles como instrumento estándar para medir turbideces bajas. Los turbidímetros no estándar como los dispositivos de antero-dispersión son más sensibles para las partículas grandes y útiles para monitorización del proceso [Water Pollution Control Federation, 1989].

2.4.2.2. Sólidos totales y sedimentables

Según Water Pollution Control Federation (1989), sólidos son los materiales suspendidos o disueltos en aguas limpias y aguas residuales, los sólidos pueden afectar negativamente a la calidad del agua o a su suministro de varias maneras, las aguas con abundantes sólidos disueltos pueden inducir una reacción fisiológica desfavorable en el consumidor ocasional. Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de aguas residuales y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertido.

- **Sólidos totales:** es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en estufa a temperatura definida, los sólidos totales incluyen los sólidos totales suspendidos o porción de sólidos totales retenida por un filtro y los sólidos disueltos totales o porción que atraviesa el filtro.

El tipo de soporte del filtro, el tamaño del poro, la porosidad, el área y el espesor del filtro, así como la naturaleza física y el tamaño de las partículas y la cantidad de material depositado en el filtro son los factores principales que afectan a la separación

de los sólidos suspendidos y disueltos. Una óptima caracterización de la materia orgánica puede llevarse a cabo mediante pruebas como la del carbono orgánico total, DBO y DQO.

- **Los líquidos sedimentables** es la expresión aplicada al material que se desprende de la suspensión en un período determinado, puede incluir material flotable, dependiendo de la técnica.
- **Sólidos sedimentables:** Aplica a los sólidos en suspensión que sedimentarían ante condiciones de calma, debido a la influencia de la gravedad [Water Pollution Control Federation, 1989].

2.4.2.3. Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de Oxígeno (DQO), corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible de oxidación al dicromato o permanganato en medio ácido [Ramalho, 2003].

La diferencia entre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y el DQO es que la DQO determina toda sustancia capaz de ser oxidable, es muy útil si se sospecha la presencia de sustancias tóxicas en el agua, que interfieren normalmente la DBO [Lizano, 2003].

3. METODOLOGÍA, EQUIPO Y DIAGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Metodología

3.1.1 Acondicionamiento del bagacillo de Cabuya

El bagacillo de cabuya se obtuvo de la finca La Lucha en San Cristóbal de Desamparados, el trabajo experimental se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica; primeramente al bagacillo se le determina el porcentaje de humedad haciendo uso de la balanza de humedad, para posteriormente secarlo a una temperatura constante de 105 °C, luego que se ha secado se procede a tamizar escogiendo los números de tamices: máxima abertura (9,51 mm), #6, #8, #20, #50, #80 y fondos y luego es empacada en bolsas con cierres para evitar que entre humedad.

3.1.2 Caracterización del bagacillo de Cabuya

Después de que el bagacillo de cabuya se ha secado, se procede a separar los tamaños de partícula mediante el método de tamizaje, por lo que se selecciona las siguientes mallas: abertura de 3/8 de pulgada, #6, #8, #20, #50, #80 y fondos.

Para este proyecto se elige el tamaño de partículas retenidas en las mallas de tamices #8, #20 y #50 con el propósito de observar el comportamiento tanto en las pruebas de caracterización como en las de filtración, de los tamaños de partículas en los extremos y en el medio, que corresponden a esos números de tamices, no se escogió la malla #6 y #80 ya que la cantidad de bagacillo de cabuya obtenida es muy pequeña.

Las características físicas a determinar son: densidad aparente, porosidad, drenabilidad y peso específico. Para las primeras 3 caracterizaciones se preparó un conjunto de 3 porómetros, según Pire y Pereira (2003), cada uno consiste en cilindros o secciones de tubo plástico de 7,62 cm de diámetro (3 pulgadas) y 15 cm de longitud, de los utilizados para el agua de drenaje doméstico, en uno de los extremos se fija con pegamento una tapa plástica en la cual se perforan cuatro orificios de 5 mm de diámetro en forma equidistante a lo largo de su borde perimetral, en el otro extremo del tubo se coloca un

conector plástico sin fijar, como se observa en las Figuras 3.1 y 3.2, para operar este dispositivo es colocado en forma vertical con la tapa perforada hacia el fondo.

Posteriormente se seleccionan los siguientes tamaños de partícula que corresponden a la selección de tamaño de los números de malla 8, 20 y 50. Las muestras son colocadas dentro de los porómetros hasta su máxima capacidad y se permite su asentamiento después de dejarlo caer en dos oportunidades desde 7,5 cm de altura sobre una mesa de madera, en cada oportunidad se rellena el cilindro con muestra adicional hasta su borde superior. Los cilindros con las muestras son colocados cada uno en un recipiente con agua cuyo nivel alcanza justo debajo del borde superior de forma de forzar el humedecimiento de la muestra desde los orificios del fondo, permitiendo a su vez la salida del aire por la cara superior [Pire y Pereira, 2003].



Figura 3.1 Porómetros contruidos para la caracterización del bagacillo de Cabuya.

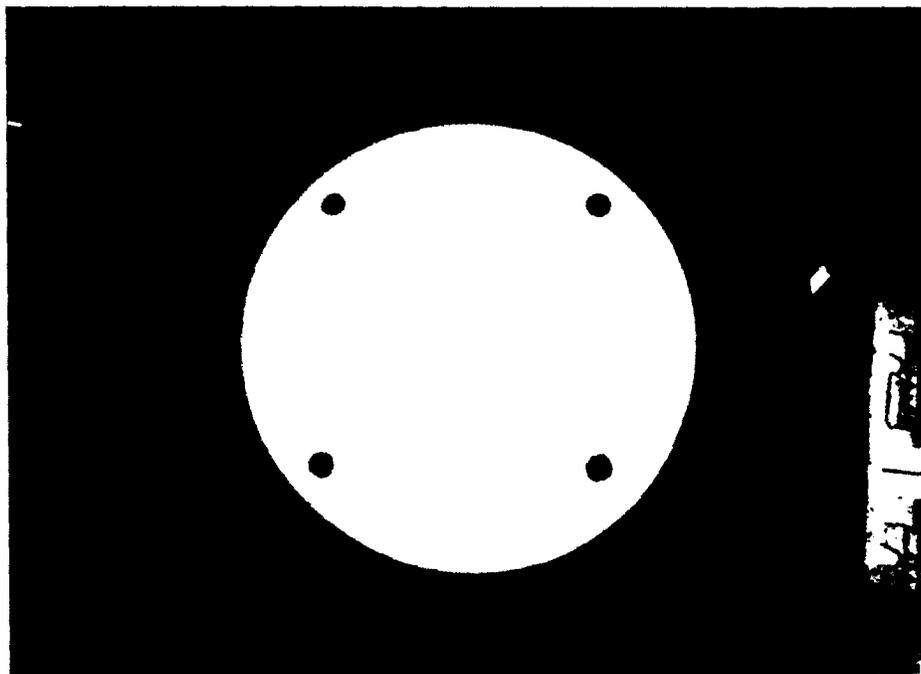


Figura 3.2 Orificios de 5 mm de diámetro de la tapa del fondo de cada porómetro.

Las muestras son dejadas en agua 3 horas, este humedecimiento produce un asentamiento adicional en el sustrato por lo que al extraer los cilindros del agua se procede a remover cuidadosamente el conector de la parte superior del porómetro y se elimina el exceso de muestra enrasándola con el borde del tubo con la ayuda de una espátula. Posteriormente se sujeta un pedazo de tela porosa (manta, liencillo) con una liga de goma para cubrir el extremo expuesto de la muestra.

Cada cilindro es colocado de nuevo en agua, esta vez sumergiéndolo por completo y extraído luego de algunos minutos, repitiendo la operación un par de veces para permitir la saturación total de la muestra. Luego de 30 minutos se colocan tapones en cada uno de los orificios del fondo y la muestra se extrae definitivamente del agua. Posteriormente son colocados verticalmente sobre un recipiente, se remueven los tapones y se mide el volumen de agua que drena en un período de 10 minutos, la muestra húmeda es extraída de los tubos y se determina el peso húmedo con una balanza, luego es colocada en una estufa a 105 °C para obtener el peso seco.

Para la determinación del peso específico se siguen las normas ASTM C127-51 y AASHTO T85-45, lo cual se seca la muestra del medio filtrante que se quiere analizar durante 24 horas a 103 °C, luego de esto se pesa una muestra de 10 gramos y se coloca en un vaso de precipitado de 400 ml, se añaden 100 ml de agua destilada y se hierve durante 5 minutos a fin de expulsar el aire.

Por otra parte se pesa un matraz desecado de 250 ml, se coloca la muestra ya enfriada dentro del matraz y se completa con agua destilada hasta la marca de aforo, se pesa el matraz con la muestra.

3.1.3 Filtración con vacío y a presión atmosférica

Para la filtración utilizando el vacío, se seleccionó un embudo büchner de diámetro interno de 0,0976 m, un kitasato de 1 L, y una presión constante de 10159,16 Pa, la altura del lecho para los tres diferentes tamaños de partícula correspondientes a las mallas #8, #20 y #50 fue de 2 cm, se cubrió el lecho con un cedazo metálico y un empaque de hule como se observa en la Figura 3,3.

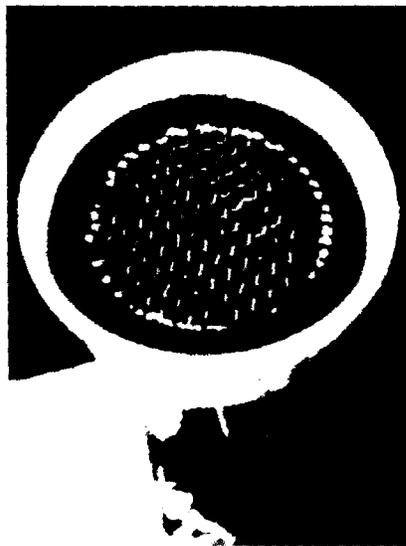


Figura 3.3 Posición del empaque y cedazo metálico sobre el lecho de bagacillo de cabuya en el embudo büchner.

Se seleccionó una muestra de 350 ml de agua residual, a la cual se le determinó la turbidez, los sólidos totales y el DQO antes de la filtración, así como la densidad y la viscosidad a una temperatura de 25 °C, se hace pasar la disolución por el lecho de

bagacillo de cabuya de diámetro de partícula correspondiente a la malla # 50 y se toma el tiempo en función del volumen que tarda en filtrarse por el mismo, este procedimiento se repite para las mallas # 20 y # 8. Posteriormente al filtrado se le determina nuevamente la turbidez, el DQO y los sólidos totales.

Se tomó una muestra de 350 ml de agua residual y se le agregó 15 ml de coagulante de aluminio WETFloc 3620 y 0,5 ml de floculante WETFloc 3010, se agitó durante 10 minutos, para posteriormente determinarle la turbidez, el DQO y los sólidos totales, la disolución se hace pasar por el lecho de bagacillo de cabuya de malla # 50 únicamente, y se toma el tiempo en función del volumen que tarda en filtrarse por el mismo, al filtrado se le determinó la turbidez, el DQO y los sólidos totales. Este procedimiento se repite nuevamente utilizando 15 ml de coagulante de aluminio WETFloc 3620 y 1 ml de floculante WETFloc 3010.

Para la filtración a presión atmosférica se utilizó el mismo büchner, la altura del lecho así como el empaque de hule y el cedazo metálico, sin embargo se seleccionó una probeta de 250 ml para la filtración, las disoluciones y el procedimiento es el mismo que en la filtración con vacío únicamente variando esta vez el volumen de las muestras que fue de 300 ml.

3.1.4 Turbidez

En la determinación de la turbidez se utilizó el espectrofotómetro con una longitud de onda de 860 nm, se preparó el blanco con agua desionizada depositándola en un recipiente de vidrio de 25 ml, siguiendo el método 8237 del manual del mismo y adaptado del método ISO 7027, se tomó una muestra de 25 ml de agua residual y se le agregó 50 ml de agua desionizada, se extrae una alícuota de 25 ml y se deposita en un recipiente de vidrio de 25 ml, el blanco se coloca en el espectrofómetro y se presiona la tecla zero para luego colocar la muestra del agua residual y leer el resultado, las unidades de turbidez se expresan en FAU (Formazin Attenuation Units).

3.1.5 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se utilizaron viales del ámbito de 0-15000 mg/l de la marca Chemetrics para la determinación del DQO, siguiendo además el método 8000 del manual del espectrofotómetro adaptado al método del Standard Methods. Con una pipeta de 2 ml se tomó agua desionizada y se colocó en uno de los viales para la preparación del blanco, se tomaron 3 ml de agua residual y se le agregó 15 ml de agua desionizada, con la pipeta se extrajo una alícuota de 2 ml y se colocó en otro vial, ambos viales se colocaron en un digestor a una temperatura de 150 °C por 2 horas, cuando los viales estuvieron fríos se limpiaron y se utilizó el espectrofotómetro a una longitud de onda de 620 nm, se colocó el blanco y se presionó la tecla zero, para luego depositar la muestra y leer el resultado en unidades de mg/l.

3.1.6 Sólidos Totales

Se sigue el método 2540 B del Standard Methods para la determinación de los sólidos totales, en el cual se calienta la mufla a una temperatura de 105 °C y se coloca adentro un crisol durante una hora, se dejó enfriar en un desecador para luego pesarlo en una balanza analítica, se homogenizó la muestra y se tomó una alícuota de 1 ml con una pipeta y se colocó dentro del crisol, se trasladó éste a la mufla por una hora a la temperatura de 105 °C, pasado ese tiempo se sacó el crisol y se dejó enfriar en un desecador, para luego pesarlo en la balanza analítica.

Para este proyecto las variables de perturbación fueron: el tipo de malla de tamiz seleccionada, las concentraciones de las disoluciones con floculante y coagulante y el volumen de las disoluciones. Las variables de respuesta fueron: el porcentaje de rendimiento de las pruebas de turbidez, sólidos totales y DQO antes y después de la filtración y el tiempo de filtración a través del lecho. Las variables de estudio fueron: la resistencia específica de la torta (α), la resistencia del medio filtrante (R_m), la densidad aparente, la porosidad, la drenabilidad y el peso específico del bagacillo de cabuya. Las variables fijas controlables fueron: el tipo de aguas residuales, la presión de vacío, la temperatura de las aguas residuales, el tamaño de los porómetros, la altura del lecho, el diámetro del büchner, el diámetro del empaque de hule y la malla de cedazo, el tiempo de drenabilidad para la caracterización del bagacillo de cabuya y la temperatura de

secado. Las variables no controlables fueron: el porcentaje de humedad del bagacillo de cabuya, la temperatura ambiente, la presión atmosférica, la caída de presión a través del lecho y la cantidad de sólidos suspendidos y totales de las aguas residuales.

3.2 Equipo experimental

En el Cuadro 3.2.1 se presenta el equipo experimental utilizado en la caracterización y la filtración del bagacillo de cabuya.

Cuadro 3.2.1 Equipo experimental

Equipo	Marca	Placa
Agitador magnético	Cole-Parmer	156942
Balanza Analítica	Denver Instruments	240466
Balanza de humedad	OHAUS	178207
Balanza	Acculab V-6000	158414
Digestor	Hach	174446
Espectrofómetro	Hach	174447
Estufa	Blue M	120757
Mufla	Jelrus Temp-Master	77540
Plantilla	Chromalox	120133
Tamices	Tyler	-
Tamizador	-	70174

3.3 Diagrama experimental

En la Figura 3.3.1 que se presenta a continuación se muestra el diagrama experimental utilizado en la prueba de filtración al vacío.

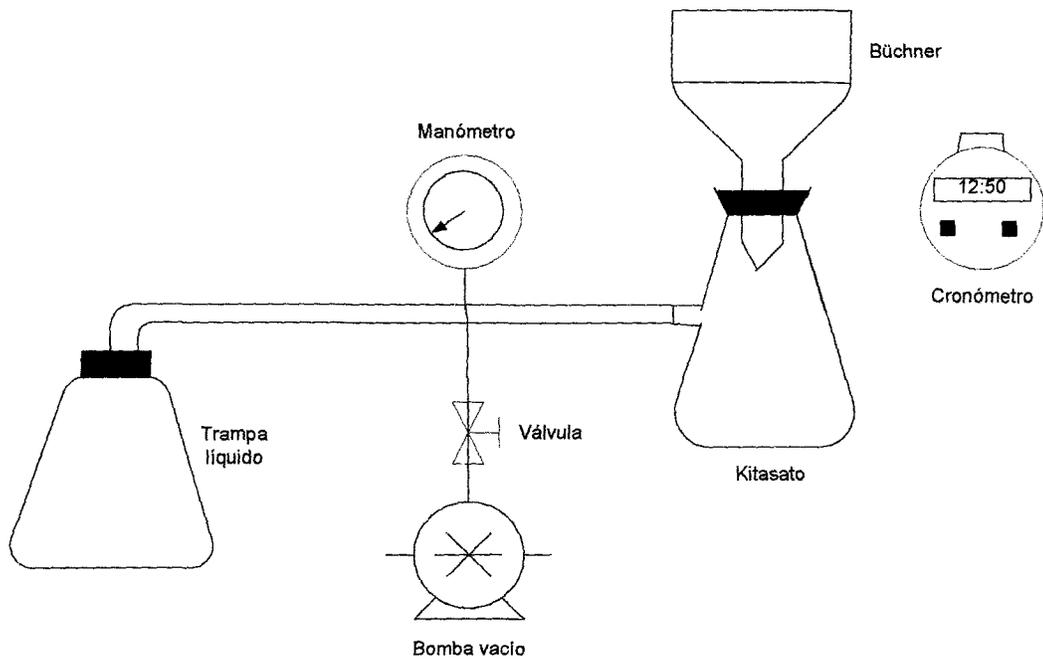


Figura 3.3.1 Diagrama experimental para la filtración al vacío.

En la Figura 3.3.2 que se presenta a continuación se muestra el diagrama experimental utilizado en la prueba de filtración a presión atmosférica.

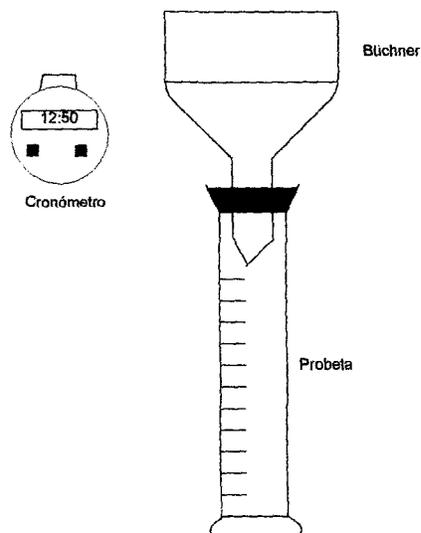


Figura 3.3.2 Diagrama experimental para la filtración a presión atmosférica.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Acondicionamiento y caracterización del bagacillo de Cabuya.

Las propiedades físicas que usualmente se determinan en la caracterización según (Pire y Pereira, 2003), son la porosidad total y la densidad aparente, por esta razón es que para este proyecto se eligen esas pruebas así como también el volumen drenado y el peso específico, además el trabajo realizado por estos autores en componentes de sustratos de uso común en la horticultura, demostraron que el uso de porómetros probó ser un método confiable y práctico de utilizar debido a su precisión y sencillez.

Con la construcción de los tres porómetros se realizan las pruebas de porosidad, densidad aparente y drenabilidad para los tres tamaños de partículas seleccionados, antes de realizar estas pruebas al bagacillo de cabuya se le determina el porcentaje de humedad (inicial) y se procede a realizar las pruebas, al concluir se le vuelve a determinar el porcentaje de humedad (final), en la metodología se observa que en casi todo el procedimiento el bagacillo está en contacto con agua y luego al final se seca, este bagacillo se vuelve a utilizar por lo que se le nombra como “usado” y al bagacillo que no se ha sometido a las pruebas como “nuevo”. En el transcurso de las pruebas se observa que los resultados de porosidad, densidad aparente y drenabilidad dependen del porcentaje de humedad tanto inicial como final, así como también el hecho de que el bagacillo de cabuya sea “nuevo” o “usado”, este comportamiento es similar en los tres tamaños de partículas seleccionados.

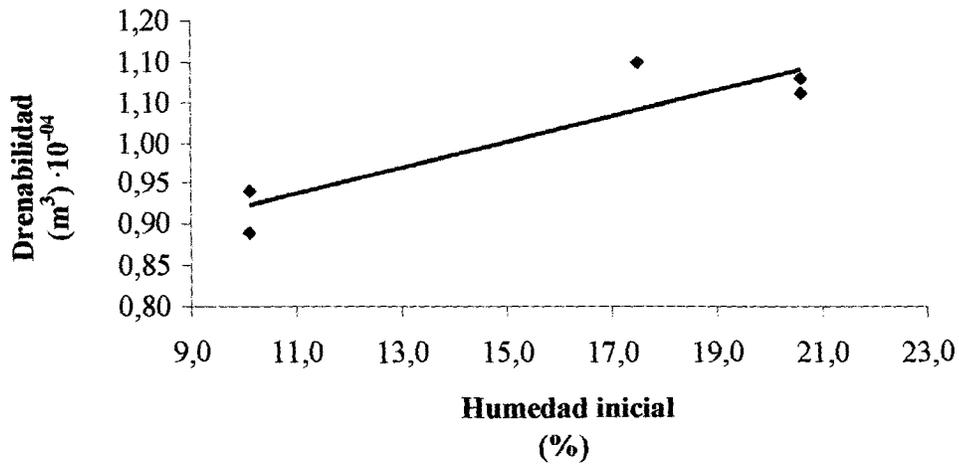


Figura 4.1.1 Drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #50 utilizando bagacillo de cabuya “nuevo”.

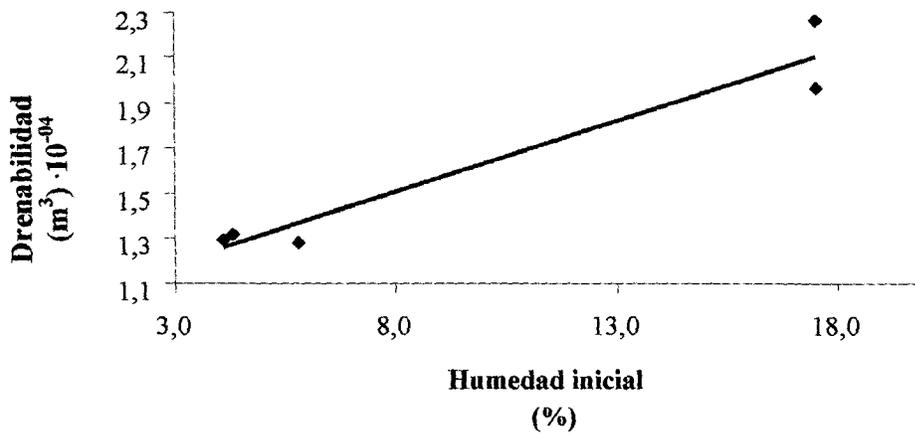


Figura 4.1.2 Drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #50 utilizando bagacillo de cabuya “usado”.

En las Figuras 4.1.1 y 4.1.2 se grafica la drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial, en ambas figuras el comportamiento es proporcional, la drenabilidad aumenta cuando el porcentaje de humedad inicial también aumenta, por lo que al existir una mayor compactación del material al tener una mayor humedad, hay menos espacios vacíos de aire, por lo que el agua drena más rápido. Por otro lado cuando el bagacillo de cabuya es “usado”, la drenabilidad es mayor, lo cual tiene sentido, ya que el bagacillo al ser usado ha sido anteriormente lavado, por lo que está libre de tierra y otras partículas que intervienen en el volumen drenado si se compara con el bagacillo que se ha denominado como “nuevo”.

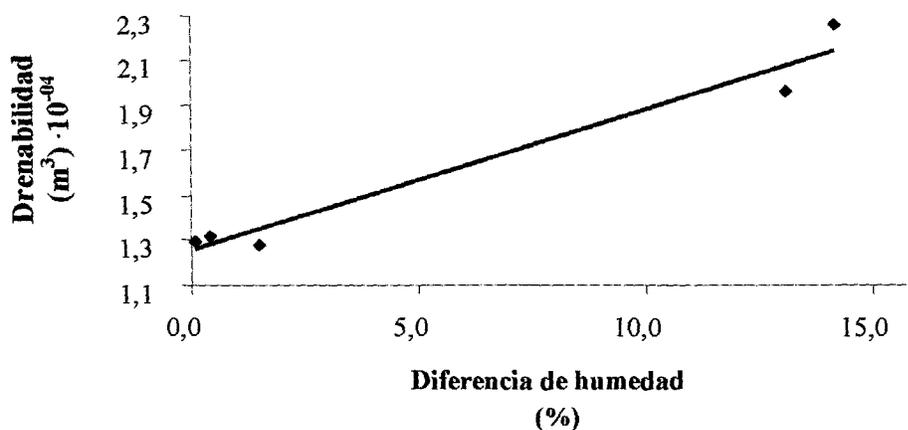


Figura 4.1.3 Drenabilidad en función del porcentaje de diferencia de humedad para el tamaño de partícula retenido en la malla #50 utilizando bagacillo de cabuya “usado”.

Cuando la diferencia del porcentaje de humedad al inicio y al final es pequeña, la drenabilidad es casi constante, cuando la diferencia es mayor, la drenabilidad aumenta, esto por la misma razón que se explicó anteriormente, ya que la humedad inicial es mayor y hay mayor compactación, este comportamiento se observa en la Figura 4.1.3, y se grafica únicamente bagacillo de cabuya “usado”, ya que el bagacillo de cabuya “nuevo” presenta un comportamiento similar. Ésta gráfica de drenabilidad en función del porcentaje de diferencia de humedad solo se va a presentar en esta discusión para el caso del material retenido en la malla # 50, ya que en los demás casos: malla # 20 y malla # 8, el comportamiento de la curva es similar.

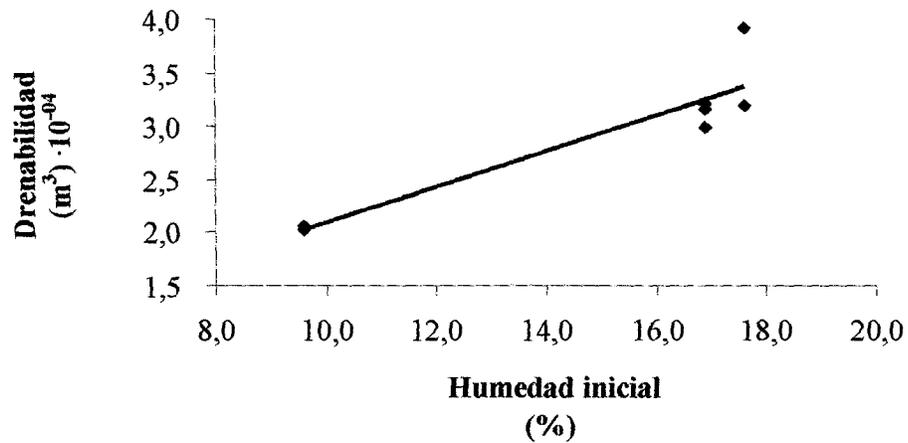


Figura 4.1.4 Drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #20 utilizando bagacillo de cabuya “nuevo”.

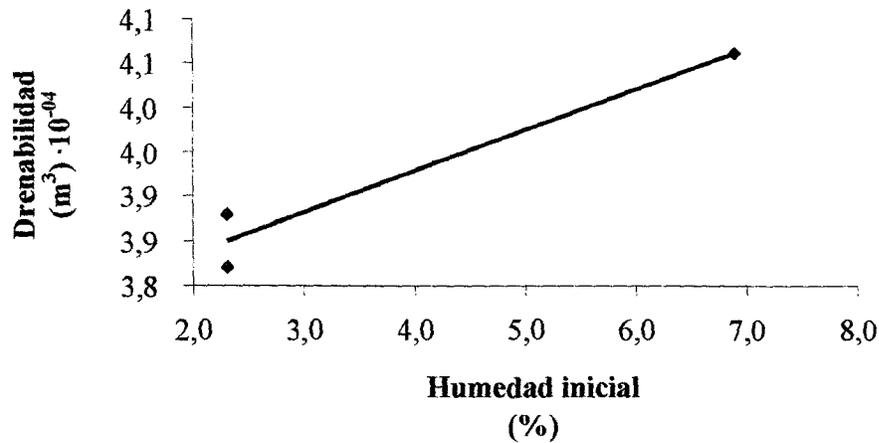


Figura 4.1.5 Drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #20 utilizando bagacillo de cabuya “usado”.

En las Figuras 4.1.4 y 4.1.5 se tienen las gráficas de drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #20, en ambas se observa el mismo comportamiento donde la drenabilidad aumenta, al

aumentar el porcentaje de humedad inicial, así como también el caso donde el bagacillo “usado” presenta una drenabilidad mayor en comparación con el bagacillo “nuevo”.

Para el caso del material retenido en la malla #8, la Figura 4.1.6 no muestra el mismo comportamiento proporcional con respecto al material retenido en las mallas #50 y #20, esto por que los valores del porcentaje de humedad inicial son muy parecidos por lo que la drenabilidad se vuelve constante, además se puede observar que los valores de drenabilidad también son similares. No se grafica el comportamiento de la drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial cuando el bagacillo de cabuya es “usado”, ya que los datos de porcentaje de humedad inicial son iguales, como se muestra en el Cuadro A.2.

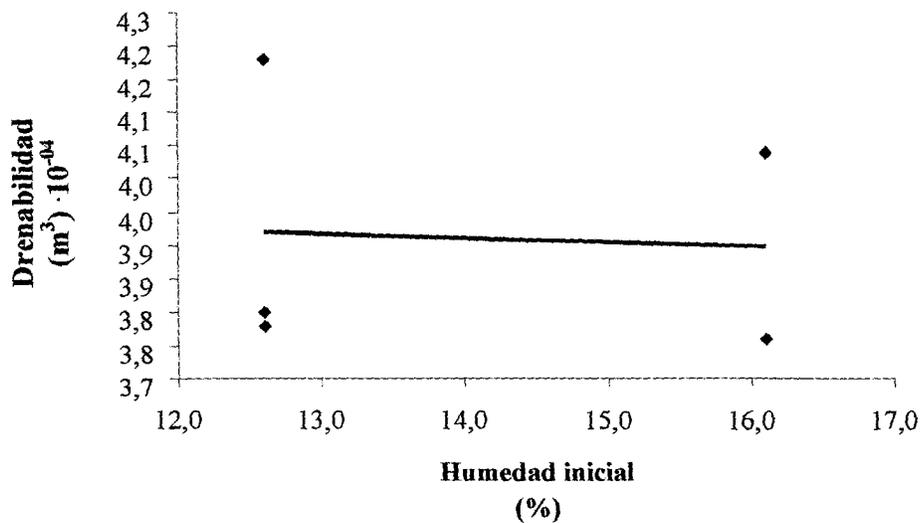


Figura 4.1.6 Drenabilidad en función del porcentaje de humedad inicial para el tamaño de partícula retenido en la malla #8 utilizando bagacillo de cabuya “nuevo”.

Una de las recomendaciones del trabajo efectuado por (Pire y Pereira, 2003) es que es importante utilizar materiales con similar contenido de humedad cuando se trate de hacer comparaciones entre las propiedades físicas, por esta razón es que en este trabajo se escogen los valores obtenidos de porosidad, densidad aparente y drenabilidad para el bagacillo de cabuya “usado”, por un lado por que es con este con se realizan las pruebas de filtración y por otro por que presenta los valores de porcentaje de humedad tanto inicial como final similares para los tres casos estudiados de tamaños de partícula.

En los Cuadros B.8, B.9 y B.10 se muestran los valores de porosidad, densidad aparente, drenabilidad y peso específico del bagacillo de cabuya retenido en las mallas #8, #20 y #50, junto con sus respectivas desviaciones y varianzas, sin embargo en el Cuadro 4.1 se presenta un resumen de estas pruebas, para la prueba de porosidad se observa que el material retenido en la malla #50 es el que presenta la mayor porosidad, seguido por el de malla #20 y finalmente malla #8, el espacio vacío o porosidad total es la porción no sólida del volumen del bagacillo, representa el volumen de aire del material seco en estufa expresado como un porcentaje del volumen total, en otras palabras es la relación entre el volumen de los espacios vacíos y el volumen total, el material retenido en la malla #50 presenta un diámetro de partícula menor o bien una menor área superficial en comparación con las malla #20 y #8, por lo que existe una separación mayor entre sus partículas, dando lugar a más espacios vacíos, por esta razón es que la malla #50 tiene una mayor porosidad comparada con las otras mallas.

Cuadro 4.1 Resultados de las pruebas de caracterización del bagacillo de cabuya de mallas: #8, #20 y #50.

Tipo de malla	Porosidad	Densidad aparente	Drenabilidad	Peso específico
	ϵ (%)	ρ_a (kg/m ³)	V_a (m ³)	P_e (kg/m ³)
Malla # 8	72,88	72	$4,32 \cdot 10^{-04}$	847
Malla # 20	76,58	89	$3,92 \cdot 10^{-04}$	940
Malla # 50	77,56	171	$1,30 \cdot 10^{-04}$	1250

La densidad aparente es una magnitud aplicada en materiales porosos, los cuales forman cuerpos heterogéneos con intersticios de aire, representa el peso seco del material con relación al volumen total, las partículas retenidas en la malla #50 al ser más pequeñas, ocupan un volumen mayor en el porómetro, (cabe más material), y como se muestra en los cuadros tiene el mayor peso específico por lo que pesa más, el material retenido en la malla #50 muestra la mayor densidad aparente, seguido del material retenido en la malla #20 y luego malla #8.

Por otro lado se puede observar que el material retenido en la malla #8 es el que presenta el mayor volumen drenado, ya que al ser menos denso, su compactación es

menor, al ser menos poroso, su retención de agua es menor, por lo que su drenabilidad o bien el volumen de agua que pasa a través del material aumenta.

Finalmente se observa que la desviación así como la varianza en todas las pruebas fue muy pequeña, esto indica que el proceso de saturación de las muestras se logró en forma muy homogénea, lo cual es uno de los pasos fundamentales para alcanzar resultados confiables en este tipo de determinación.

4.2 Filtración

Las aguas residuales que se utilizan para la filtración, son de la Compañía Sur Química S.A. del punto de captación de las aguas de lavado, que están constituidas en su mayoría por pigmentos, resinas, aditivos y solventes, así como también el floculante y el coagulante de la marca WetFloc son de la misma compañía.

Como se observa en la metodología, se escoge la altura del lecho de 0,02 m y a éste se le coloca un empaque de hule y un cedazo metálico con el fin de que el lecho no se expanda cuando se realiza la filtración, la presión de vacío que se escoge es la más baja posible de 10.159,16 Pa, que es la lectura que marca el manómetro, las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales se eligieron porque son unas de las pruebas más comunes que se les realizan a las aguas residuales, además de ser una medida para corroborar por medio del rendimiento que tanto está funcionando el filtro, se procede a realizar las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales a las aguas residuales a una temperatura de 25 °C antes de la filtración, estos valores se encuentran en el Cuadro A.8, así como también se mide la densidad, y viscosidad del agua residual, estos valores se encuentran en el Cuadro A.35.

Se elige un volumen de 350 ml de agua residual para la filtración, y en el büchner se coloca el tamaño de partícula retenido por la malla #50, y se procede a mojarlo con agua, esto con dos propósitos, el primero para que el bagacillo se compacte y no salgan partículas por la parte inferior del filtro y segundo como ya se discutió anteriormente, al tener un porcentaje de humedad inicial mayor, la drenabilidad aumenta.

Se mide el tiempo en función del volumen que pasa el agua residual por el filtro y se grafica el tiempo dividido por el volumen en función del volumen, como se observa en la Figura 4.2.1.

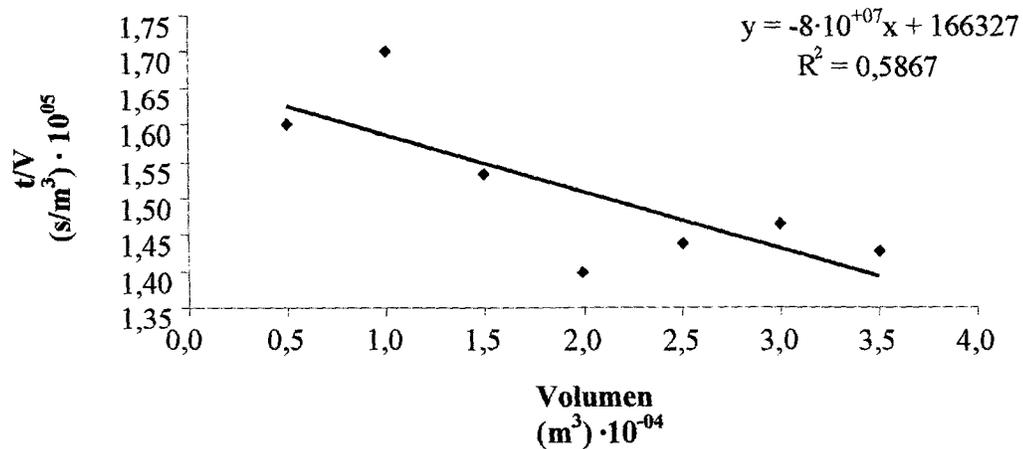


Figura 4.2.1 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #50.

La Figura 4.2.1 tiene como fin determinar la resistencia específica de la torta así como la resistencia específica del medio filtrante, sin embargo al tener una pendiente negativa, da como resultado que el bagacillo de cabuya retenido en la malla #50 no presenta ninguna resistencia como también lo muestra la malla #20 en la figura 4.2.2. La gráfica para el tamaño de partícula retenido en la malla #8 no se hizo ya que los tiempos para la filtración eran muy pequeños, sin embargo como se comparó anteriormente en la caracterización, la malla #8 es la que presenta la mayor drenabilidad, por lo que si la malla # 50 no tuvo ninguna resistencia mucho menos la va a tener la malla # 8.

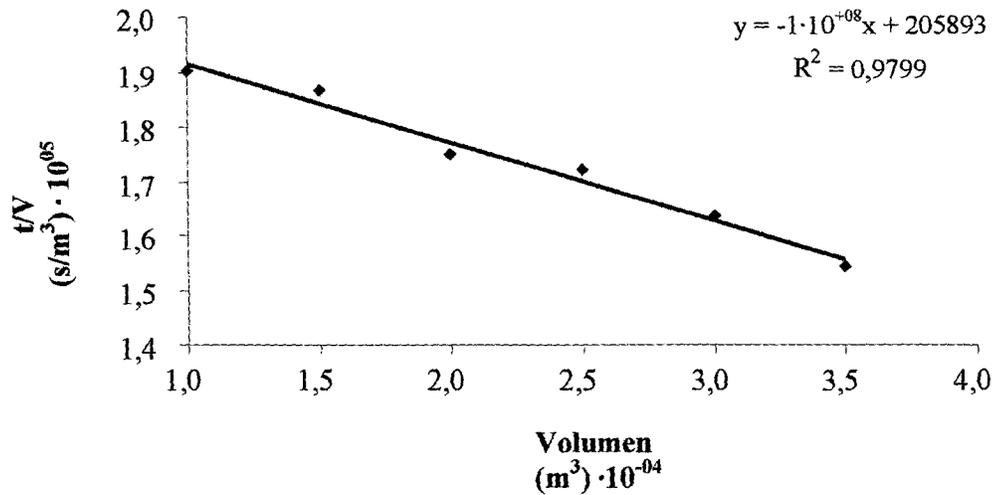


Figura 4.2.2 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #20.

En el Cuadro 4.2 se muestran los porcentajes de rendimiento de las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales, el bagacillo de cabuya de malla #50 es la que muestra el mayor rendimiento en las 3 pruebas realizadas. Como se explicó anteriormente las partículas de bagacillo en la malla #50 presentan más espacios vacíos, por lo que es más poroso, además al ser más denso es mayor la cantidad de material de bagacillo de cabuya en el lecho, esto permite que las partículas de sólidos y otros componentes en las aguas residuales queden atrapadas dentro de estos espacios vacíos y sobre la superficie del lecho, dando como resultado mayores rendimientos en las pruebas.

Cuadro 4.2 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya de mallas 8, 20 y 50.

Prueba	Rendimiento malla	Rendimiento malla	Rendimiento malla
	# 8 (%)	#20 (%)	#50 (%)
Turbidez	5,38	6,18	6,95
DQO	7,07	7,43	13,97
Sólidos totales	21,26	22,0	24,56

Como se observó anteriormente, la prueba de filtración con el bagacillo de cabuya para las mallas #8, #20 y #50, no presentan ninguna resistencia o su resistencia es despreciable, por lo que se realiza una prueba en el laboratorio preparando disoluciones hechas con bozorola de café de tamaño de partícula retenido en la malla #100, esto con el propósito de observar si el filtro hecho con el bagacillo de cabuya funciona como medio filtrante (bajo las mismas condiciones con se realizaron las pruebas anteriores con las aguas residuales), por lo que al realizar las pruebas en los tamaños de partículas #8, #20 y #50 se observa que el tamaño de partícula retenido por la malla #50 es el que retiene mas sólidos. Sin embargo, las aguas residuales con las que se trabaja, en su mayoría tienen muchos sólidos suspendidos, esta información se obtuvo de la compañía, así que se decide agregarles a las aguas residuales una cantidad de floculante y coagulante para que éstos sólidos se aglomeren y formen flóculos o partículas de tamaños más grandes, y como en la prueba que se realizó con la bozorola, el tamaño de partícula retenido en la malla #50 fue la que retuvo más, entonces se decide realizar las pruebas de filtración con floculante y coagulante únicamente en la malla #50, además de que la cantidad de floculante y coagulante con la que se cuenta no es suficiente para realizar las pruebas en las mallas #20 y #8.

Con la información que suministra la compañía donde se obtienen las aguas residuales, es que se parte de la idea de agregar 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante para la primera prueba y 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante para la segunda, utilizando vacío en el lecho construido con partículas retenidas en la malla #50, a las aguas con floculante y coagulante se les mide la turbidez, el DQO y sólidos totales antes de la filtración, estos datos se encuentran en el Cuadro A.12 y A.14 así como también la densidad y la viscosidad, estos datos se encuentran en el Cuadro A.36

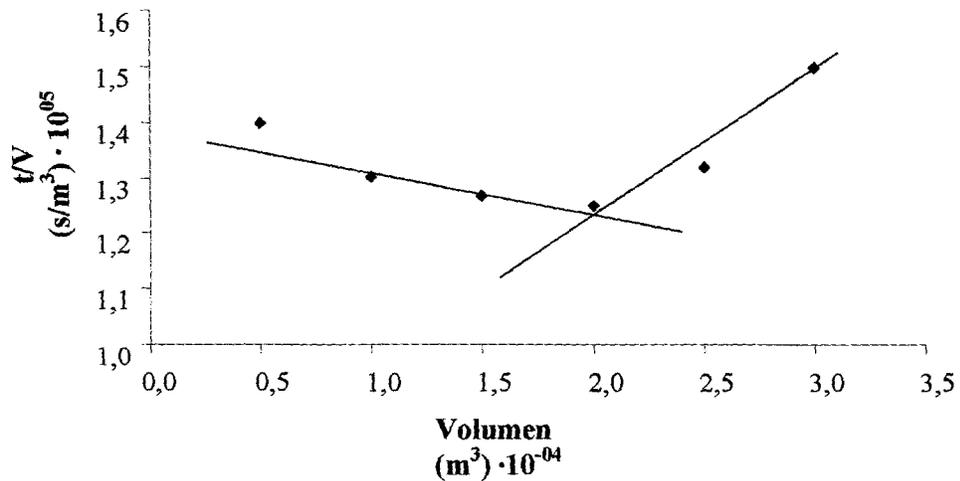


Figura 4.2.3 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración al vacío utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.

En las Figuras 4.2.3 y 4.2.4 se observa que en ambas gráficas la pendiente es negativa hasta el volumen de $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ y luego la pendiente se vuelve positiva, por lo que se supone que a partir de ese punto es que el filtro comienza a presentar una resistencia tanto del lecho como del medio filtrante, debido a que en el lecho quedan atrapados sólidos que provocan que la resistencia comience a aumentar. Después de la filtración se le realiza al filtrado las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales, los rendimientos se muestran en los Cuadros B.13 y B.14, donde se observa que los mayores rendimientos se obtienen cuando se filtra la disolución con 0,5 ml de floculante, lo cual corresponde con el comportamiento de las gráficas ya que es ahí donde se observa que la pendiente es mayor por lo que habría una mayor resistencia.

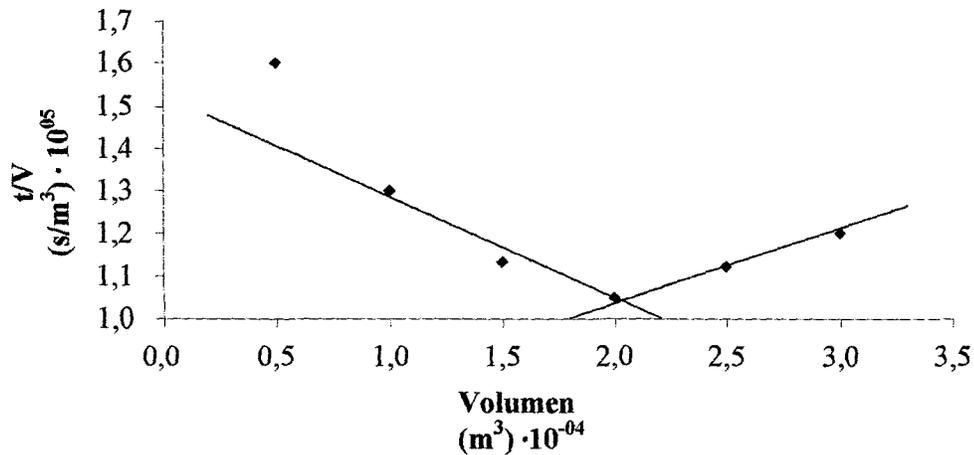


Figura 4.2.4 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración al vacío utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.

Como se está trabajando con la presión de vacío más pequeña que se puede tener, se decide realizar las mismas pruebas anteriores pero sin utilizar vacío, suponiendo que la caída de presión hidrostática es constante en toda la filtración, por lo que esta vez se escoge trabajar con una probeta de 250 ml y al igual que en la filtración con vacío se realiza las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para las aguas residuales que se van a filtrar en las mallas #8, #20 y #50. Estos datos se encuentran en los Cuadros A.16, A.17 y A.18.

En la Figura 4.2.5 y en la Figura 4.2.6 se tiene el comportamiento de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya retenido en las mallas #8 y #20, como se observa las pendiente son negativas por lo que nuevamente se concluye que no hay una resistencia específica de la torta ni del medio filtrante apreciable. En esta ocasión si se tienen lecturas de tiempo para el caso de malla #8 aunque como se observa en el Cuadro A.32 los tiempos son cada segundo, por lo que se corrobora lo que se dijo anteriormente en el caso de la filtración utilizando vacío, ya que si los tiempos son pequeños no utilizando vacío (cada segundo) lo son aún más con la filtración al vacío.

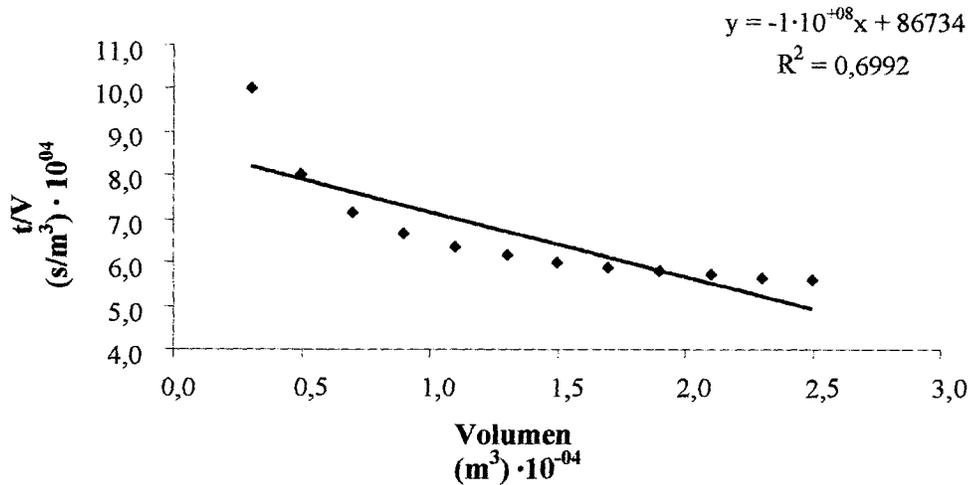


Figura 4.2.5 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #8.

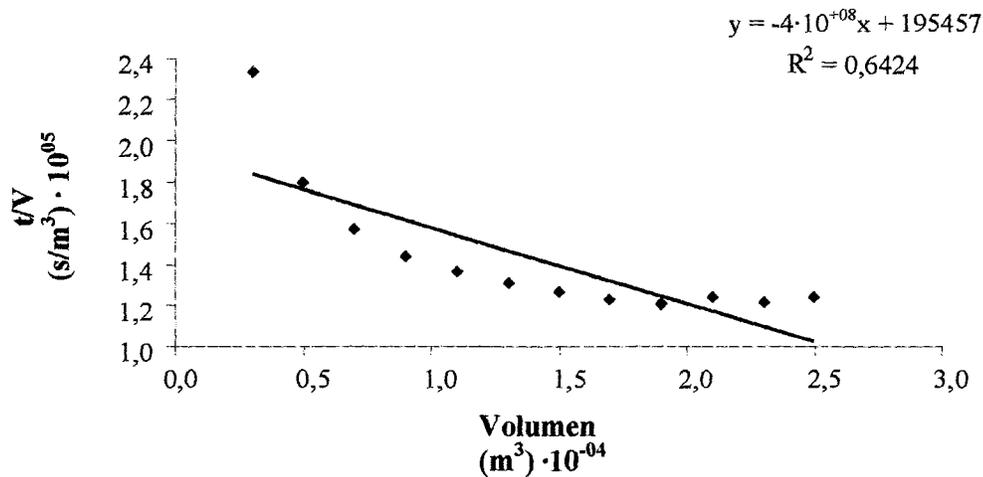


Figura 4.2.6 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #20.

Por otra parte, en la Figura 4.2.7 se tiene la gráfica de t/V en función del volumen para el caso del bagacillo de cabuya retenido en la malla #50; como se observa la pendiente es positiva, por lo que en esta ocasión si hay presente una resistencia específica de la torta y del medio filtrante.

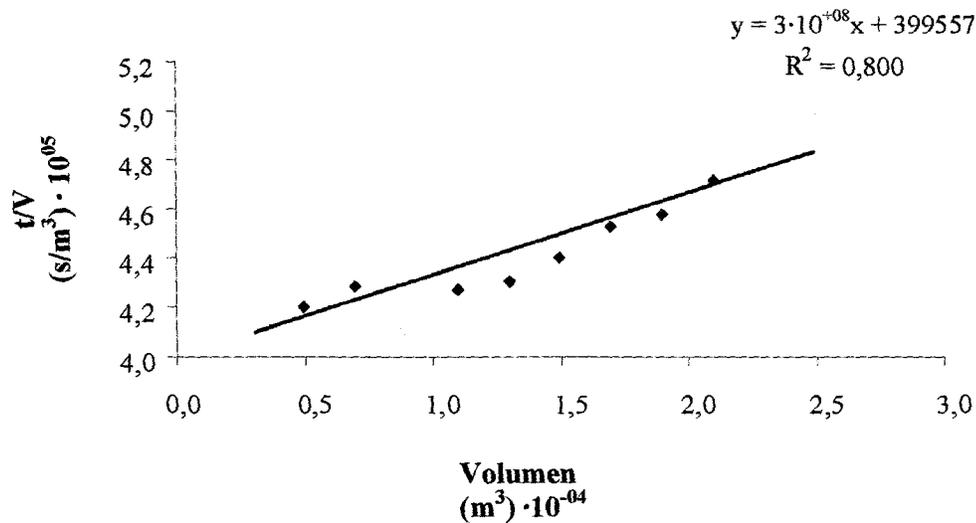


Figura 4.2.7 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #50.

De acuerdo con la literatura consultada, la Figura 4.2.7 presenta el comportamiento esperado cuando hay presente una resistencia específica del lecho y del medio filtrante, por esta razón es que en este caso y no en los anteriores (donde no hubo una resistencia apreciable), se decide hacer un análisis de residuos a los resultados encontrados que según Montgomery (1984), el análisis de residuos se lleva a cabo para comprobar si se cumplen o no los supuestos del modelo; la distribución de los residuos debe ser normal en los residuos observados y esperados, que bajo la hipótesis de distribución normal deben ser parecidos, ésta suposición se comprueba con el gráfico de probabilidad normal y el resultado debe ser similar al de una recta que pasa por el origen, aunque conviene tener en cuenta que siempre tenderá a observarse mayor variabilidad en los extremos como es éste el caso, en la Figura 4.2.8 se tiene el gráfico de probabilidad normal para la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya malla #50, como se observa en el gráfico, los puntos que se alejan de la línea recta son los extremos, que puede ser debido a un error experimental a la hora de observar y anotar el tiempo inicial y final de la filtración, sin embargo hay un punto que se sale también de la línea recta y es el que tiene las coordenadas $(9,0 \cdot 10^{-05}; 4,11 \cdot 10^{+05})$, debido a razones de limitación de reactivos y aguas residuales, las pruebas no se lograron repetir, por lo tanto no se sabe con exactitud cual es el error que se comete en el punto antes mencionado, por lo

tanto es recomendable para un proyecto posterior, que las pruebas de filtración se deban repetir, con el objetivo de encontrar las posibles causas de los errores en los resultados. Los puntos que se alejan de la recta en el gráfico de residuos son los que se muestran en la Figura 4.2.7 que están representados en color rojo y en el Cuadro B.18 se encuentran los datos que se obtienen para la elaboración de la Figura 4.2.8.

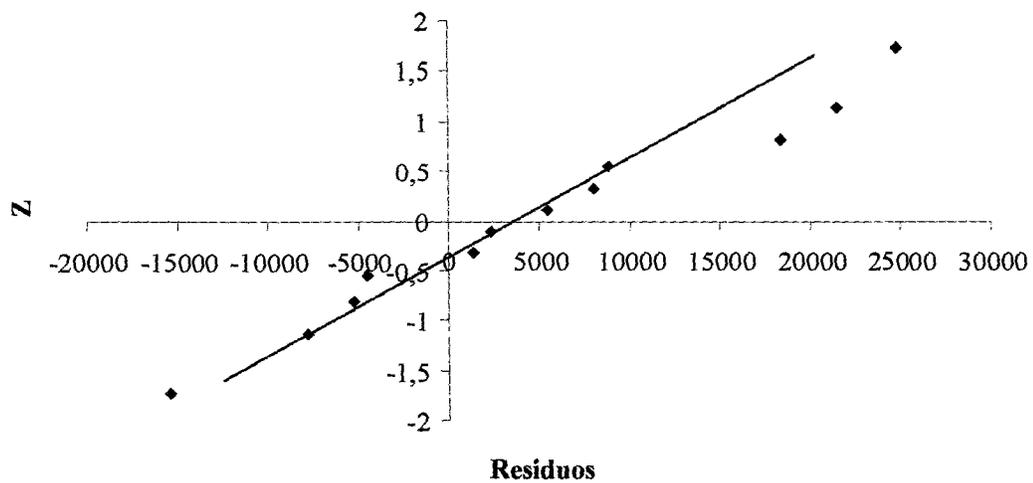


Figura 4.2.8 Gráfico de probabilidad normal para la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya de malla #50.

Con los resultados que se obtienen del gráfico de probabilidad normal, es que se decide descartar los datos que presentan error, y volver a graficar los datos de volumen en función del t/V de la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya de malla #50, en la Figura 4.2.9 se observa que el valor del ajuste R mejora con un valor de 0,875 comparado con el que se obtiene en la Figura 4.2.7 de 0,80, además es con éste gráfico que se calcula el valor de la resistencia específica del lecho y del medio filtrante, éstos valores se encuentran en el Cuadro B.15.

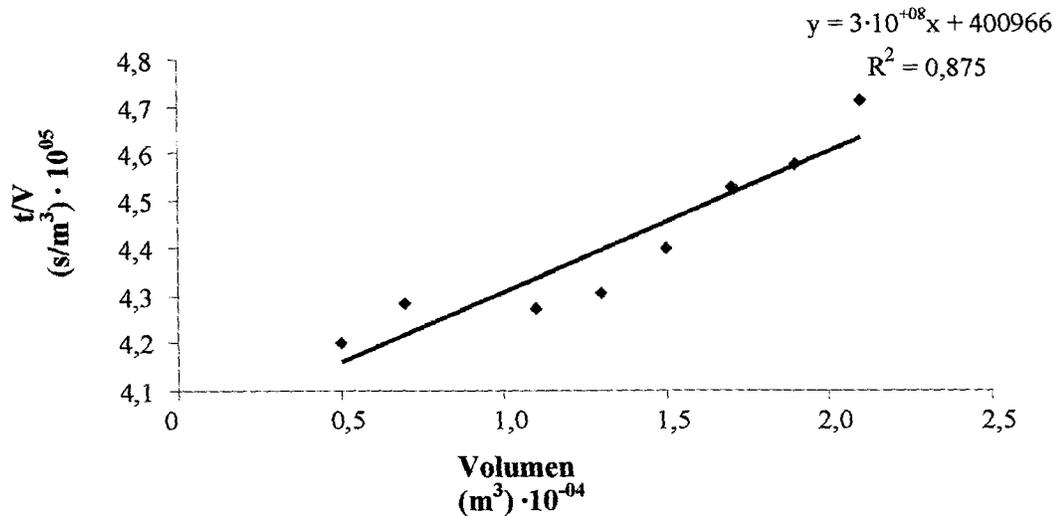


Figura 4.2.9 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica corregido utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #50.

En el Cuadro 4.3 se tienen los porcentajes de rendimientos para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales, para las mallas #8, #20 y #50, al igual que en el caso de la filtración con vacío, la malla #50 es la que presenta el mayor rendimiento en las tres pruebas, seguido por el de malla #20, y por último el de malla #8. Además al no presentar ninguna resistencia apreciable las mallas #8 y #20, los valores de turbidez, DQO y sólidos totales son muy bajos comparados con el de malla #50.

Cuadro 4.3 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya de mallas 8, 20 y 50.

Prueba	Rendimiento malla	Rendimiento malla	Rendimiento malla
	# 8 (%)	#20 (%)	#50 (%)
Turbidez	11,52	16,20	32,42
DQO	1,77	0,21	14,09
Sólidos totales	1,54	1,55	19,03

Como en la filtración a presión atmosférica en malla #50 se obtiene una resistencia específica de la torta y del medio filtrante, se decide realizar las pruebas utilizando floculante y coagulante en las mismas concentraciones utilizadas en la filtración con vacío. En las Figuras 4.2.10 y 4.2.11 se presentan las gráficas y como se observa en

ambos casos la pendiente es positiva por lo que hay una resistencia específica del lecho y una resistencia del medio filtrante.

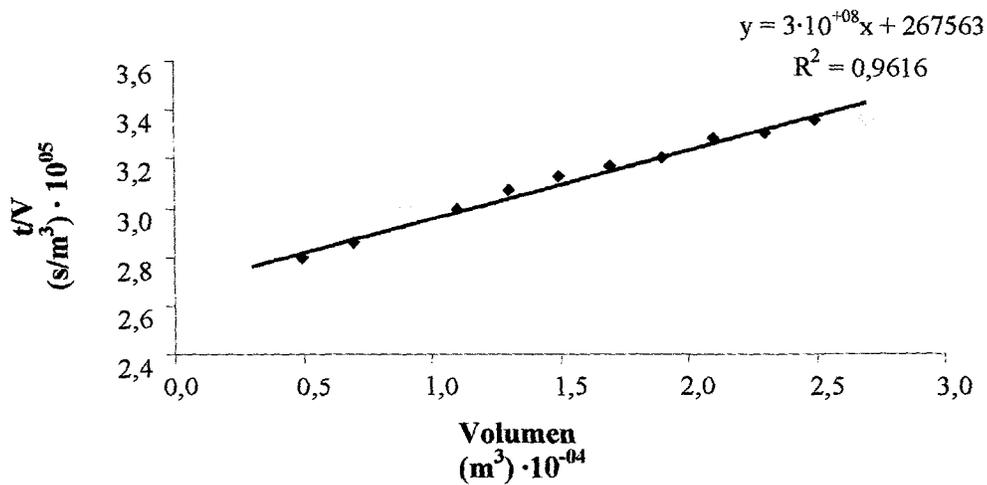


Figura 4.2.10 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.

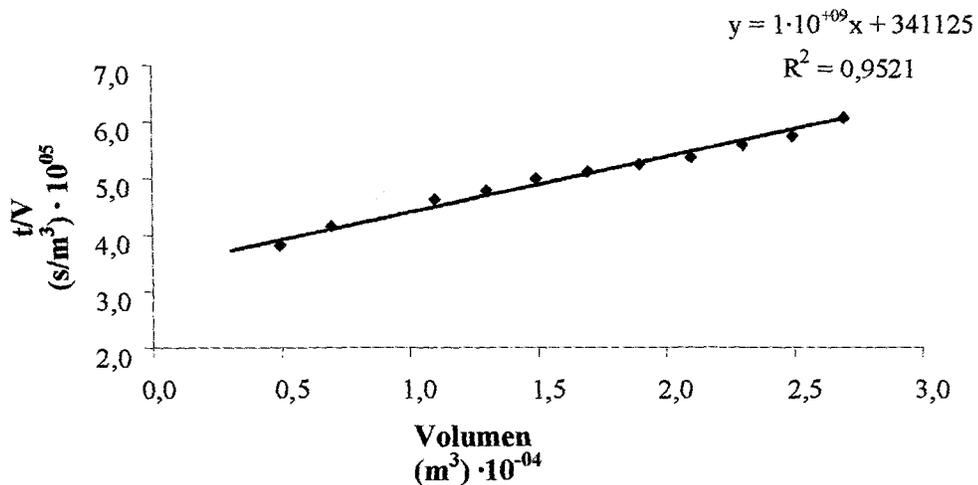


Figura 4.2.11 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.

Como en el caso de la filtración a presión atmosférica en malla #50, se decide realizar un análisis de residuos para los casos donde se utiliza floculante y coagulante, en la Figura 4.2.12 se muestra el gráfico de probabilidad normal, donde nuevamente se observa que se encuentra un error en los extremos como predice la teoría y como se comentó anteriormente, pero además se observa que se cometió el mismo error que en el caso de la Figura 4.2.7 en la cuarta medición, donde el mismo punto se sitúa fuera de la recta, estos puntos se representan en color rojo en la Figura 4.2.10 y como se mencionó anteriormente no se tienen pruebas suficientes para demostrar cuál es la causa de éste error.

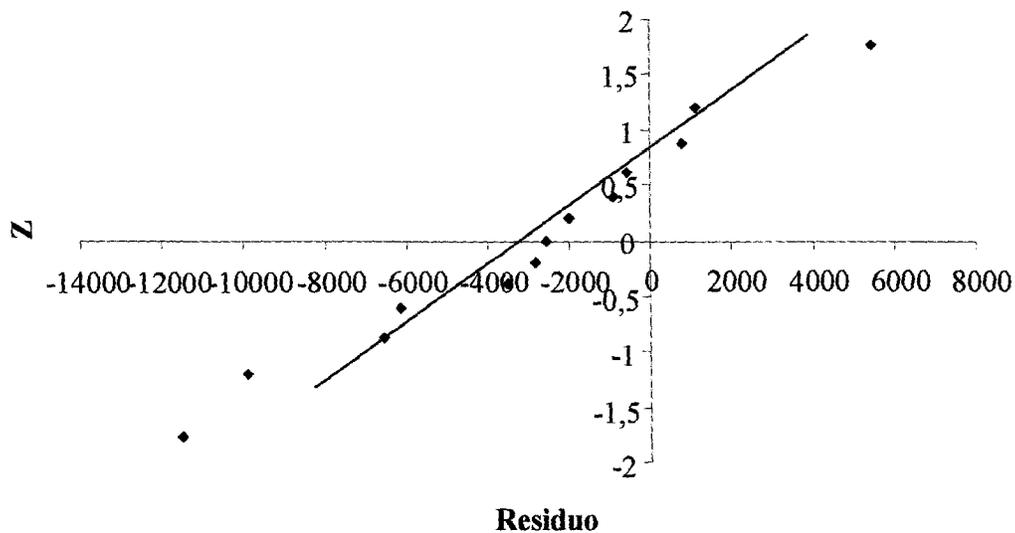


Figura 4.2.12 Gráfico de probabilidad normal para la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya de malla #50 utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante.

Se vuelve a graficar los resultados de la Figura 4.2.10, pero descartando los datos que presentan error y que se obtienen del análisis de la gráfica de probabilidad normal, en la Figura 4.2.13 se observa que el ajuste mejora pasando de un valor de 0,9616 a un valor de 0,9859.

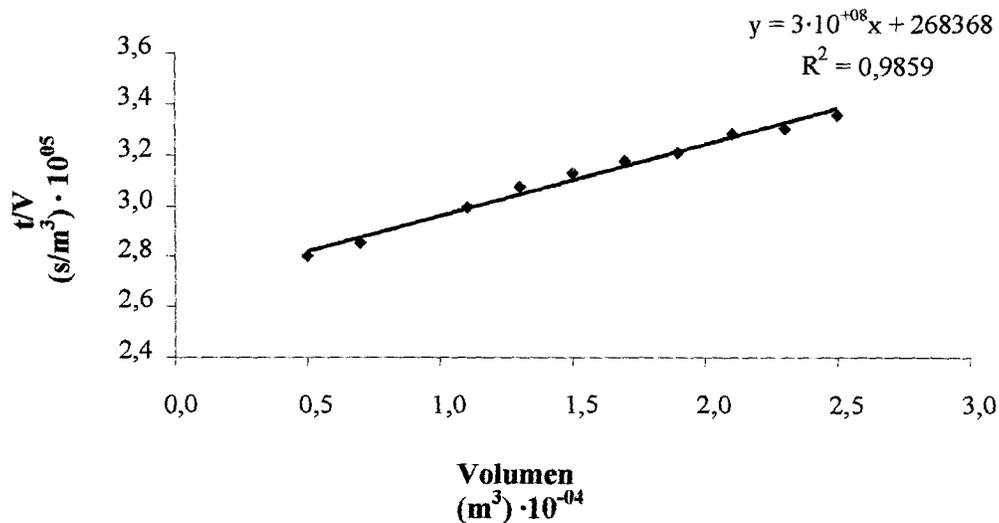


Figura 4.2.13 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica corregida utilizando 0,5 mL de floculante y 15 mL de coagulante en malla #50.

Por otra parte, en la Figura 4.2.14 se tiene el gráfico de probabilidad normal para el caso de la filtración a presión atmosférica, pero utilizando 1 ml de floculante, como se observa en la figura, y en la Figura 4.2.11 donde se muestran los datos de error en color rojo, nuevamente se tiene el mismo error en la cuarta medición, pero esta vez únicamente se presenta un error en la primera medición y no en la última como en los casos anteriores, como se discutió anteriormente para los otros casos, no se tiene claro el error que puede presentar esa cuarta medición, ya que no se realizaron mas pruebas.

Se vuelve a graficar los datos que se representaron en la Figura 4.2.11 pero descartando los dos datos de error, y se obtiene el comportamiento de la Figura 4.2.15, donde se observa que el ajuste mejoró pasando de un valor de R igual a 0,9521 a 0,9850. Los datos para la elaboración de los gráficos de probabilidad normal utilizando floculante se encuentran en los Cuadros B.19 y B.20

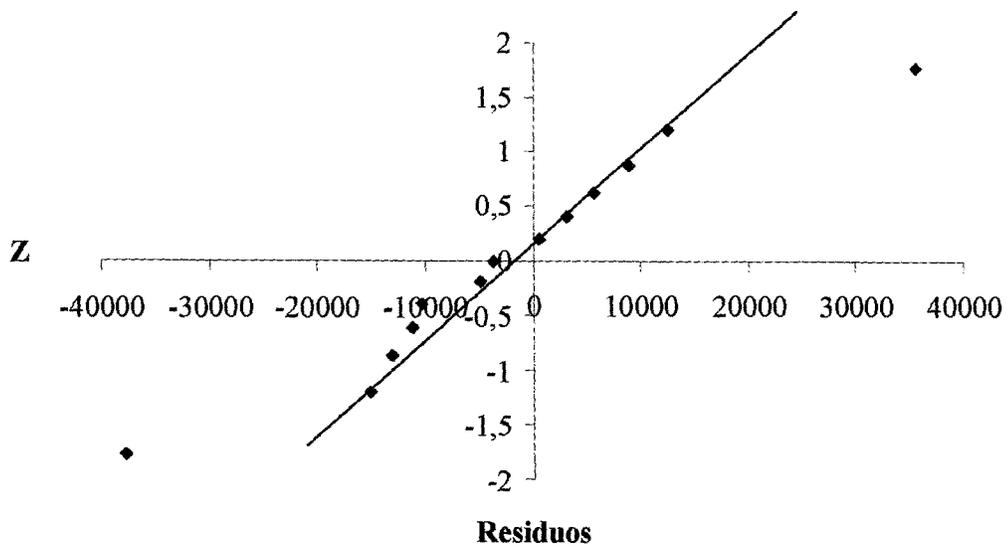


Figura 4.2.14 Gráfico de probabilidad normal para la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya de malla #50 utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante.

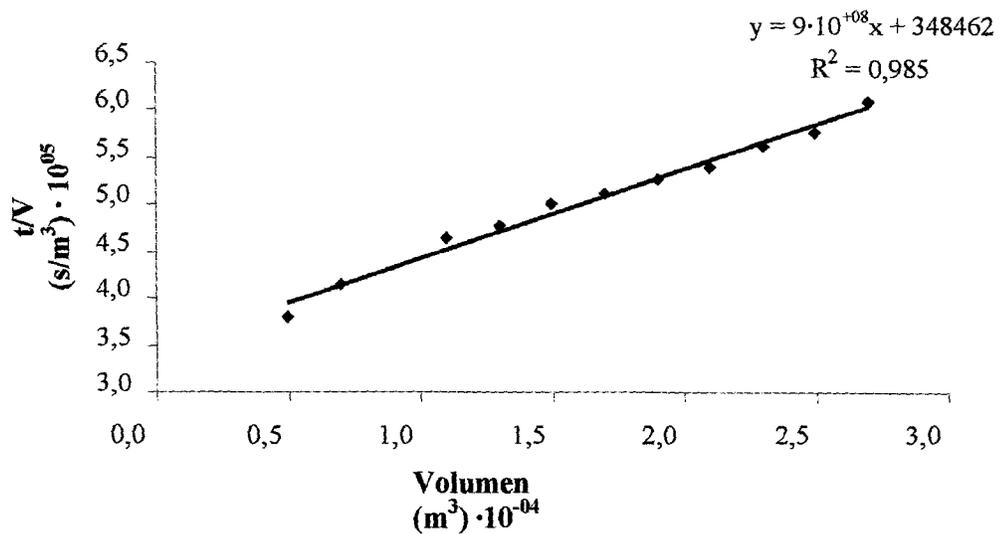


Figura 4.2.15 Gráfica de t/V en función del volumen para la filtración a presión atmosférica corregida, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante en malla #50.

Si se compara los resultados obtenidos de resistencia específica de la torta y del medio filtrante que se muestran en los Cuadros B.16 y B.17, se observa que ambas resistencias para el caso donde se utiliza 1 ml de floculante son mayores que en el caso donde se utiliza 0,5 ml de floculante, sin embargo si se compara estas resistencias con la resistencia obtenida para el caso sin el uso de floculante, los valores son menores, para representar mejor esto se presentan los resultados juntos en el Cuadro 4.4.

Cuadro 4.4 Datos de resistencia específica y resistencia del medio filtrante para la filtración a presión atmosférica en malla #50 sin floculante y con floculante.

Parámetro	Filtración a presión atmosférica Malla #50	Filtración a presión atmosférica utilizando 1 ml floculante + 15 ml coagulante malla #50	Filtración a presión atmosférica utilizando 0,5 ml floculante + 15 ml coagulante malla #50
Resistencia específica de la torta (α) (m/kg)	$7,54 \cdot 10^{+09}$	$2,37 \cdot 10^{+09}$	$1,07 \cdot 10^{+09}$
Resistencia del medio filtrante (R_m) (m^{-1})	$6,12 \cdot 10^{+11}$	$6,12 \cdot 10^{+11}$	$4,71 \cdot 10^{+11}$

Según Mc Cabe (2002) y Aguilar, N (2007), la resistencia específica de la torta se incrementa con ΔP debido a la alta compactación y reducción en la porosidad del lecho cuando la presión se incrementa, además en una suspensión con una mezcla de flóculos de partículas muy pequeñas, la resistencia de la torta depende de las propiedades de los flóculos en vez de la geometría de las partículas individuales, por esta razón es que en la filtración utilizando 1 ml de floculante la resistencia específica es mayor que cuando se utiliza 0,5 ml de floculante, al existir más flóculos, se eleva la compactación del lecho por lo que aumenta la resistencia específica de la torta, por otra parte la viscosidad de la disolución es inversamente proporcional a la resistencia específica de la torta y del medio filtrante, por lo que al no tener la disolución floculante y coagulante, es menos viscoso, por lo que aumenta la resistencia específica de la torta y del medio filtrante, como se observa en los resultados del Cuadro 4.4 para el caso de la filtración donde no se utiliza floculante.

Aunque la filtración a presión atmosférica y sin floculante tenga un ΔP menor, la resistencia específica sigue siendo más alta que en los casos utilizando floculante, sin embargo la concentración de sólidos y la viscosidad es inversamente proporcional a la resistencia específica y en el caso de la filtración a presión atmosférica y sin floculante ambos valores son menores, de hecho la concentración de sólidos es la octava parte de lo que retuvo la filtración utilizando 0,5 ml de floculante, por lo tanto hay menos sólidos y la torta no se está compactando, por lo que podría suponerse que la torta se comporta incompresible, con respecto a los otros casos, donde los sólidos están presentes en mayor cantidad y están forzando más a la torta a comprimirse, por lo que la resistencia específica es menor debido a la fuerza de empuje que están realizando los sólidos junto con el líquido de las aguas residuales.

Por otra parte, se puede observar del Cuadro 4.4 que la resistencia del medio filtrante es mayor que la resistencia específica de la torta en todos los casos, de acuerdo con la ecuación (2.3), la resistencia del medio filtrante no depende de la masa de los sólidos en la solución a filtrar, por lo que su valor aumenta, pero además un resultado importante que se observa en el cuadro, es que la resistencia del medio filtrante tanto en la filtración sin floculante como en la filtración utilizando 1 ml de floculante, presentan el mismo valor y según Mc Cabe (2002), la resistencia del medio filtrante varía con el tiempo y la limpieza del medio, pero como sólo es importante durante las primeras etapas de la filtración, casi siempre resulta satisfactorio suponer que es constante durante cualquier filtración, y obtener su valor de datos experimentales, sin embargo en este proyecto no se puede dar este hecho como una conclusión, a pesar de que se ha obtenido un valor constante en los dos casos, ya que no se realizaron más pruebas que fueran repetitivas y que corroboren esta afirmación, por lo que se llega de nuevo a la recomendación que se hizo anteriormente, donde es importante para un proyecto posterior realizar más repeticiones de las pruebas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La porosidad, densidad aparente y el volumen drenado dependen del porcentaje de humedad inicial, así como el hecho de que el bagacillo de Cabuya sea “nuevo” o “usado”.
- El bagacillo de Cabuya retenido en la malla #50 es el que presenta el mayor porcentaje de porosidad, densidad aparente y peso específico, mientras que el bagacillo de Cabuya retenido en la malla #8 es que el presenta la mayor drenabilidad.
- El método utilizado por medio de porómetros, resultó ser una herramienta sencilla y confiable para ser empleado en evaluaciones de las propiedades físicas de materiales porosos.
- El bagacillo de cabuya retenido en las mallas #8 y #20 no presentaron resistencias específicas del lecho ni del medio filtrante apreciables en las filtraciones utilizando vacío y presión atmosférica.
- En las pruebas realizadas de turbidez, DQO y sólidos totales, el bagacillo de cabuya retenido en la malla #50, fue el que presentó el mayor porcentaje de rendimiento tanto en la filtración al vacío como en la de presión atmosférica.
- La filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya retenido en la malla #50 fue el único caso que presentó una resistencia específica de la torta y del medio filtrante, así como también en los casos en que se utilizó floculante y coagulante.
- En las pruebas de filtración se comprobó que al no utilizar una presión de vacío, los resultados fueron satisfactorios, por lo que a nivel industrial es una ventaja ya que se ahorra energía y compra de equipo en el uso de bagacillo de cabuya como medio filtrante

-
- Se recomienda que al efectuar las pruebas de filtración, el bagacillo de cabuya esté retenido por medio de un empaque con cedazo de metal o algún otro material que evite que éste se expanda.
 - Se recomienda que antes de realizar la filtración, el bagacillo de cabuya sea humedecido como el propósito de aumentar su drenabilidad y compactación.
 - Como se comprobó que el bagacillo de cabuya sirve como medio filtrante, se recomienda para un proyecto posterior el uso de éste, utilizando una filtración continua, donde se compruebe el punto de saturación del lecho, con otro tipo de aguas residuales.
 - Se recomienda realizar las pruebas con mayor profundidad de lecho filtrante y utilizando tamaños menores de diámetro de partículas (malla #80 o malla #100), además de hacer repeticiones de todas las pruebas de filtración, con el fin de tener un análisis estadístico mejor de los resultados.

6. NOMENCLATURA

Símbolo	Significado	Unidades
A	Área	M
D	Diámetro	M
H	Altura	M
K_c	Constante en la ecuación para la filtración de la torta a presión constante	s/m^6
P	Probabilidad	Adim
P_a	Peso específico del agua	kg/m^3
P_B	Peso del matraz	kg
P_e	Peso específico	kg/m^3
P_H	Peso de la muestra húmeda	kg
P_S	Peso de la muestra seca	kg
P_T	Peso total	kg
R_m	Resistencia del medio filtrante	m^{-1}
U	Velocidad lineal del filtrado basado en el área del filtro	m/s
V	Volumen	m^3
V_a	Volumen drenado	m^3
V_c	Volumen porómetro	m^3
V_H	Volumen de agua	m^3
V_M	Volumen muestra	m^3
Z	Distribución normal estándar	Adim
C	Masa del sólido depositada en el filtro por unidad de volumen	kg/m^3
m_c	Masa total de sólidos en la torta	kg
Letras griegas		
A	Resistencia específica de la torta	m/kg
E	Porosidad	%
M	Viscosidad	$Pa \cdot s$
ρ_a	Densidad aparente	kg/m^3
ΔP	Caída de presión global	Pa
ΔP_c	Caída de presión en la torta	Pa
ΔP_m	Caída de presión en el medio filtrante	Pa

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, N. (2007). Análisis de la capacidad de drenado de celulosa de bagazo de caña de azúcar. [Versión electrónica]. *Revista Ingeniería*, 17(2), 103-113.
- Aguilar, S., Ramírez, J., & Malagán, O. (2007). Extracción de fibras no leñosas: cabuya (*Furcraea andina* Trel.) y banano (*Musa paradisiaca* L.) para estandarizar un proceso tecnológico destinado a la elaboración de pulpa y papel [Versión electrónica]. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 8(2), 89-98.
- Arias, C. (1998). Análisis técnico y económico de tres productos obtenidos a partir de cabuya. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Chávez, L. (1998). Estudio preliminar para el aprovechamiento de los residuos del proceso de desfibrado de la cabuya. Proyecto de graduación presentado como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Química, Escuela de Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Gamboa, G. (1985). La estopa como medio filtrante en filtros para piscina. Proyecto de graduación sometido a la Facultad de Ingeniería como requisito parcial para optar por el grado en Licenciatura en Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Geankopolis, C.J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. (3ª ed). México D.F.: Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
- Gómez, A. (1988). Producción de pulpa química para la fabricación de papel a partir de cabuya. Proyecto de graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Química. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Izquierdo, E. (1979). Estudio socioeconómico en dos zonas productoras de cabuya (*furcraea* cabuya) en el cantón de León Cortés. Proyecto de graduación presentado como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Economía Agrícola, Escuela de Economía Agrícola, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Lizano, R. (2003). Caracterización y propuesta de optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales de la urbanización André Challé tercera etapa. Informe de trabajo de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Mc Cabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2002). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. (6ª ed). México D.F.: McGraw-Hill/Interamericana de México

-
- Ministerio de Salud. (2007). *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*. Costa Rica. La Gaceta N° 55.
- Montgomery, D. (1984). *Design and analysis of experiments*. (2ª ed). United States of América.: John Wiley & Sons, Inc.
- Navarro, J. R. (1968). *Filtración*. Proyecto de graduación para optar por el grado Ingeniero Químico, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Pire, R; Pereira, A. (2003). *Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado Lara, Venezuela. Propuesta metodológica*. [Versión electrónica]. *Revista Bioagro*, 15(1), 55-63.
- Robles, J. Entrevista personal, 11 de febrero de 2010
- Ramallo, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. España.: Editorial Reverté S.A.
- Soto, C. (1985). *Estudio de prefactibilidad para la producción de fibra de cabuya (Furcraea cabuya) en dos zonas productoras del cantón de el Guarco y el establecimiento de una propuesta de crédito para pequeños productores*. Proyecto de graduación para optar al título de Ingeniero Agrónomo en el grado de Licenciatura en Economía Agrícola, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Water Pollution Control Federation.(1989). *Métodos normalizados para el análisis de agua potables y residuales*. (17ª ed). Madrid, España.: Ediciones Días de Santos.

APÉNDICES

A. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Cuadro A.1 Dimensiones de los porómetros.

Porómetro	Diámetro interno	Altura
	D (m)	h (m)
A	$8,41 \cdot 10^{-02}$	0,154
B	$8,41 \cdot 10^{-02}$	0,148
C	$8,41 \cdot 10^{-02}$	0,150

Cuadro A.2 Datos obtenidos de drenabilidad, humedad y peso de las muestras para el cálculo de la porosidad y densidad aparente del bagacillo de cabuya malla # 8.

Corrida	Tipo de muestra	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)	Diferencia de humedad (%)	Peso muestra húmeda P_H (kg)	Peso muestra seca P_S (kg)	Drenabilidad V_a (m^3)
1	Nueva	16,10	9,90	6,20	0,285	0,070	$4,04 \cdot 10^{-04}$
2	Nueva	16,10	14,10	2,00	0,313	0,072	$3,76 \cdot 10^{-04}$
3	Nueva	12,60	3,40	9,20	0,252	0,065	$4,18 \cdot 10^{-04}$
4	Nueva	12,60	3,30	9,30	0,325	0,072	$3,80 \cdot 10^{-04}$
5	Nueva	12,60	3,30	9,30	0,279	0,064	$3,78 \cdot 10^{-04}$
6	Usada	4,10	3,20	0,90	0,243	0,061	$4,35 \cdot 10^{-04}$
7	Usada	4,10	3,40	0,70	0,238	0,060	$4,32 \cdot 10^{-04}$
8	Usada	4,10	3,50	0,60	0,237	0,059	$4,30 \cdot 10^{-04}$

Cuadro A.3 Datos obtenidos de drenabilidad, humedad y peso de las muestras para el cálculo de la porosidad y densidad aparente del bagacillo de cabuya malla # 20

Corrida	Tipo de muestra	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)	Diferencia de humedad (%)	Peso muestra húmeda P_H (kg)	Peso muestra seca P_S (kg)	Drenabilidad V_a (m^3)
1	Nueva	17,6	17,6	0	0,325	0,078	$3,92 \cdot 10^{-04}$
2	Nueva	17,6	11,6	6	0,483	0,096	$3,20 \cdot 10^{-04}$
3	Nueva	16,9	3	13,9	0,380	0,081	$3,22 \cdot 10^{-04}$
4	Nueva	16,9	4,7	12,2	0,350	0,077	$3,16 \cdot 10^{-04}$
5	Nueva	16,9	2	14,9	0,346	0,079	$2,98 \cdot 10^{-04}$
6	Nueva	9,6	2,4	7,2	0,586	0,140	$2,06 \cdot 10^{-04}$
7	Nueva	9,6	1	8,6	0,547	0,138	$2,02 \cdot 10^{-04}$
9	Usada	6,9	1,8	5,1	0,330	0,074	$4,06 \cdot 10^{-04}$
10	Usada	2,3	2	0,3	0,320	0,076	$3,82 \cdot 10^{-04}$
11	Usada	2,3	1,8	0,5	0,328	0,073	$3,88 \cdot 10^{-04}$

Cuadro A.4 Datos obtenidos de drenabilidad, humedad y peso de las muestras para el cálculo de la porosidad y densidad aparente del bagacillo de cabuya malla # 50

Corrida	Tipo de muestra	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)	Diferencia de humedad (%)	Peso muestra húmeda P _H (kg)	Peso muestra seca P _S (kg)	Drenabilidad V _a (m ³)
1	Nueva	20,60	20,60	0,00	0,685	0,145	1,06·10 ⁻⁰⁴
2	Nueva	20,60	20,60	0,00	0,671	0,160	1,08·10 ⁻⁰⁴
3	Nueva	17,50	4,30	13,20	0,696	0,135	1,10·10 ⁻⁰⁴
4	Usada	17,50	4,40	13,10	0,542	0,105	1,96·10 ⁻⁰⁴
5	Usada	17,50	3,30	14,20	0,534	0,103	2,26·10 ⁻⁰⁴
6	Nueva	10,10	2,00	8,10	0,757	0,212	8,90·10 ⁻⁰⁵
7	Nueva	10,10	2,40	7,70	0,704	0,189	9,40·10 ⁻⁰⁵
8	Usada	5,80	4,30	1,50	0,647	0,130	1,28·10 ⁻⁰⁴
9	Usada	4,10	4,01	0,09	0,670	0,159	1,30·10 ⁻⁰⁴
10	Usada	4,30	3,90	0,40	0,659	0,138	1,32·10 ⁻⁰⁴

Cuadro A.5 Datos obtenidos para el cálculo del peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #8.

Muestra	Peso muestra P _M (kg)	Peso matraz P _B (kg)	Peso total P _T (kg)	Peso de la muestra + agua (kg)	Volumen de agua V _H (m ³)	Volumen de la muestra V _M (m ³)
1	0,010	0,112	0,362	0,249	2,39·10 ⁻⁰⁴	1,02·10 ⁻⁰⁵
2	0,010	0,110	0,359	0,249	2,39·10 ⁻⁰⁴	1,06·10 ⁻⁰⁵
3	0,010	0,086	0,334	0,247	2,37·10 ⁻⁰⁴	1,24·10 ⁻⁰⁵
4	0,010	0,112	0,359	0,246	2,36·10 ⁻⁰⁴	1,31·10 ⁻⁰⁵
5	0,010	0,086	0,333	0,247	2,37·10 ⁻⁰⁴	1,27·10 ⁻⁰⁵
6	0,010	0,110	0,357	0,247	2,37·10 ⁻⁰⁴	1,24·10 ⁻⁰⁵

Cuadro A.6 Datos obtenidos para el cálculo del peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #20.

Muestra	Peso muestra P _M (kg)	Peso matraz P _B (kg)	Peso total P _T (kg)	Peso de la muestra + agua (kg)	Volumen de agua V _H (m ³)	Volumen de la muestra V _M (m ³)
1	0,010	0,113	0,361	0,247	2,37·10 ⁻⁰⁴	1,23·10 ⁻⁰⁵
2	0,010	0,093	0,342	0,248	2,38·10 ⁻⁰⁴	1,13·10 ⁻⁰⁵
3	0,010	0,110	0,359	0,248	2,38·10 ⁻⁰⁴	1,16·10 ⁻⁰⁵
4	0,010	0,093	0,343	0,250	2,40·10 ⁻⁰⁴	9,69·10 ⁻⁰⁶
5	0,010	0,092	0,342	0,250	2,40·10 ⁻⁰⁴	9,70·10 ⁻⁰⁶
6	0,010	0,090	0,340	0,250	2,40·10 ⁻⁰⁴	9,81·10 ⁻⁰⁶

Cuadro A.7 Datos obtenidos para el cálculo del peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #50.

Muestra	Peso muestra P_M (kg)	Peso matraz P_B (kg)	Peso total P_T (kg)	Peso de la muestra + agua (kg)	Volumen de agua V_H (m ³)	Volumen de la muestra V_M (m ³)
1	0,010	0,093	0,345	0,252	$2,41 \cdot 10^{-04}$	$8,03 \cdot 10^{-06}$
2	0,010	0,092	0,344	0,252	$2,42 \cdot 10^{-04}$	$7,72 \cdot 10^{-06}$
3	0,010	0,090	0,342	0,252	$2,42 \cdot 10^{-04}$	$7,95 \cdot 10^{-06}$
4	0,010	0,110	0,362	0,251	$2,41 \cdot 10^{-04}$	$8,33 \cdot 10^{-06}$
5	0,010	0,086	0,338	0,251	$2,41 \cdot 10^{-04}$	$8,11 \cdot 10^{-06}$
6	0,010	0,112	0,365	0,252	$2,42 \cdot 10^{-04}$	$7,95 \cdot 10^{-06}$

Cuadro A.8 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración al vacío.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	12510
DQO (ppm)	9276
Sólidos Totales (ppm)	5753

Cuadro A.9 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 8.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	11836
DQO (ppm)	8620
Sólidos Totales (ppm)	4530

Cuadro A.10 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 20.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	11736
DQO (ppm)	8586
Sólidos Totales (ppm)	4493

Cuadro A.11 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	11640
DQO (ppm)	7980
Sólidos Totales (ppm)	4340

Cuadro A.12 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración al vacío, utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	12045
DQO (ppm)	8148
Sólidos Totales (ppm)	34440

Cuadro A.13 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración al vacío, utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	10821
DQO (ppm)	6990
Sólidos Totales (ppm)	30540

Cuadro A.14 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración al vacío, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	12336
DQO (ppm)	7386
Sólidos Totales (ppm)	31480

Cuadro A.15 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración al vacío, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	11628
DQO (ppm)	6570
Sólidos Totales (ppm)	30360

Cuadro A.16 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 8.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	12651
DQO (ppm)	7060
Sólidos Totales (ppm)	5840

Cuadro A.17 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 20.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	12651
DQO (ppm)	7060
Sólidos Totales (ppm)	4520

Cuadro A.18 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	12651
DQO (ppm)	7060
Sólidos Totales (ppm)	4780

Cuadro A.19 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 8.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	11193
DQO (ppm)	6935
Sólidos Totales (ppm)	5750

Cuadro A.20 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 20.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	10602
DQO (ppm)	7045
Sólidos Totales (ppm)	4450

Cuadro A.21 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	8550
DQO (ppm)	6065
Sólidos Totales (ppm)	3870

Cuadro A.22 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración a presión atmosférica, utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	12534
DQO (ppm)	6790
Sólidos Totales (ppm)	33300

Cuadro A.23 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales antes de la filtración a presión atmosférica, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	12627
DQO (ppm)	6840
Sólidos Totales (ppm)	31160

Cuadro A.24 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración a presión atmosférica, utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	8178
DQO (ppm)	4370
Sólidos Totales (ppm)	25910

Cuadro A.25 Datos obtenidos de las pruebas con aguas residuales después de la filtración a presión atmosférica, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante con bagacillo de cabuya malla 50.

Prueba	Resultado
Turbidez (FAU)	8961
DQO (ppm)	4920
Sólidos Totales (ppm)	20050

Cuadro A.26 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 20.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
5,00·10 ⁻⁰⁵	9,0	1,80·10 ⁺⁰⁵
1,00·10 ⁻⁰⁴	19,0	1,90·10 ⁺⁰⁵
1,50·10 ⁻⁰⁴	28,0	1,87·10 ⁺⁰⁵
2,00·10 ⁻⁰⁴	35,0	1,75·10 ⁺⁰⁵
2,50·10 ⁻⁰⁴	43,0	1,72·10 ⁺⁰⁵
3,00·10 ⁻⁰⁴	49,0	1,63·10 ⁺⁰⁵
3,50·10 ⁻⁰⁴	54,0	1,54·10 ⁺⁰⁵

Cuadro A.27 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 50.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
5,00·10 ⁻⁰⁵	8,0	1,60·10 ⁺⁰⁵
1,00·10 ⁻⁰⁴	17,0	1,70·10 ⁺⁰⁵
1,50·10 ⁻⁰⁴	23,0	1,53·10 ⁺⁰⁵
2,00·10 ⁻⁰⁴	28,0	1,40·10 ⁺⁰⁵
2,50·10 ⁻⁰⁴	36,0	1,44·10 ⁺⁰⁵
3,00·10 ⁻⁰⁴	44,0	1,47·10 ⁺⁰⁵
3,50·10 ⁻⁰⁴	50,0	1,43·10 ⁺⁰⁵

Cuadro A.28 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 50, agregando 0,5 ml de floculante + 15 ml de coagulante.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
5,00·10 ⁻⁰⁵	7,0	1,40·10 ⁺⁰⁵
1,00·10 ⁻⁰⁴	13,0	1,30·10 ⁺⁰⁵
1,50·10 ⁻⁰⁴	19,0	1,27·10 ⁺⁰⁵
2,00·10 ⁻⁰⁴	25,0	1,25·10 ⁺⁰⁵
2,50·10 ⁻⁰⁴	33,0	1,32·10 ⁺⁰⁵
3,00·10 ⁻⁰⁴	45,0	1,50·10 ⁺⁰⁵

Cuadro A.29 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya malla 50, agregando 1 ml de floculante + 15 ml de coagulante.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
5,00·10 ⁻⁰⁵	8,0	1,60·10 ⁺⁰⁵
1,00·10 ⁻⁰⁴	13,0	1,30·10 ⁺⁰⁵
1,50·10 ⁻⁰⁴	17,0	1,13·10 ⁺⁰⁵
2,00·10 ⁻⁰⁴	21,0	1,05·10 ⁺⁰⁵
2,50·10 ⁻⁰⁴	28,0	1,12·10 ⁺⁰⁵
3,00·10 ⁻⁰⁴	36,0	1,20·10 ⁺⁰⁵

Cuadro A.30 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 50.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
3,00·10 ⁻⁰⁵	13,0	4,33·10 ⁺⁰⁵
5,00·10 ⁻⁰⁵	21,0	4,20·10 ⁺⁰⁵
7,00·10 ⁻⁰⁵	30,0	4,29·10 ⁺⁰⁵
9,00·10 ⁻⁰⁵	37,0	4,11·10 ⁺⁰⁵
1,10·10 ⁻⁰⁴	47,0	4,27·10 ⁺⁰⁵
1,30·10 ⁻⁰⁴	56,0	4,31·10 ⁺⁰⁵
1,50·10 ⁻⁰⁴	66,0	4,40·10 ⁺⁰⁵
1,70·10 ⁻⁰⁴	77,0	4,53·10 ⁺⁰⁵
1,90·10 ⁻⁰⁴	87,0	4,58·10 ⁺⁰⁵
2,10·10 ⁻⁰⁴	99,0	4,71·10 ⁺⁰⁵
2,30·10 ⁻⁰⁴	112,0	4,87·10 ⁺⁰⁵
2,50·10 ⁻⁰⁴	124,0	4,96·10 ⁺⁰⁵

Cuadro A.31 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 20.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
3,00·10 ⁻⁰⁵	7,0	2,33·10 ⁺⁰⁵
5,00·10 ⁻⁰⁵	9,0	1,80·10 ⁺⁰⁵

Cuadro A.31 (continuación). Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 20.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
7,00·10 ⁻⁰⁵	11,0	1,57·10 ⁺⁰⁵
9,00·10 ⁻⁰⁵	13,0	1,44·10 ⁺⁰⁵
1,10·10 ⁻⁰⁴	15,0	1,36·10 ⁺⁰⁵
1,30·10 ⁻⁰⁴	17,0	1,31·10 ⁺⁰⁵
1,50·10 ⁻⁰⁴	19,0	1,27·10 ⁺⁰⁵
1,70·10 ⁻⁰⁴	21,0	1,24·10 ⁺⁰⁵
1,90·10 ⁻⁰⁴	23,0	1,21·10 ⁺⁰⁵
2,10·10 ⁻⁰⁴	26,0	1,24·10 ⁺⁰⁵
2,30·10 ⁻⁰⁴	28,0	1,22·10 ⁺⁰⁵
2,50·10 ⁻⁰⁴	31,0	1,24·10 ⁺⁰⁵

Cuadro A.32 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 8.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
3,00·10 ⁻⁰⁵	3,0	1,00·10 ⁺⁰⁵
5,00·10 ⁻⁰⁵	4,0	8,00·10 ⁺⁰⁴
7,00·10 ⁻⁰⁵	5,0	7,14·10 ⁺⁰⁴
9,00·10 ⁻⁰⁵	6,0	6,67·10 ⁺⁰⁴
1,10·10 ⁻⁰⁴	7,0	6,36·10 ⁺⁰⁴
1,30·10 ⁻⁰⁴	8,0	6,15·10 ⁺⁰⁴
1,50·10 ⁻⁰⁴	9,0	6,00·10 ⁺⁰⁴
1,70·10 ⁻⁰⁴	10,0	5,88·10 ⁺⁰⁴
1,90·10 ⁻⁰⁴	11,0	5,79·10 ⁺⁰⁴
2,10·10 ⁻⁰⁴	12,0	5,71·10 ⁺⁰⁴
2,30·10 ⁻⁰⁴	13,0	5,65·10 ⁺⁰⁴
2,50·10 ⁻⁰⁴	14,0	5,60·10 ⁺⁰⁴

Cuadro A.33 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 50, agregando 0,5 ml de floculante + 15 ml de coagulante.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
3,00·10 ⁻⁰⁵	8,0	2,67·10 ⁺⁰⁵
5,00·10 ⁻⁰⁵	14,0	2,80·10 ⁺⁰⁵
7,00·10 ⁻⁰⁵	20,0	2,86·10 ⁺⁰⁵
9,00·10 ⁻⁰⁵	27,0	3,00·10 ⁺⁰⁵
1,10·10 ⁻⁰⁴	33,0	3,00·10 ⁺⁰⁵
1,30·10 ⁻⁰⁴	40,0	3,08·10 ⁺⁰⁵
1,50·10 ⁻⁰⁴	47,0	3,13·10 ⁺⁰⁵
1,70·10 ⁻⁰⁴	54,0	3,18·10 ⁺⁰⁵

Cuadro A.33 (continuación). Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla # 50, agregando 0,5 ml de floculante + 15 ml de coagulante.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
1,90·10 ⁻⁰⁴	61,0	3,21·10 ⁺⁰⁵
2,10·10 ⁻⁰⁴	69,0	3,29·10 ⁺⁰⁵
2,30·10 ⁻⁰⁴	76,0	3,30·10 ⁺⁰⁵
2,50·10 ⁻⁰⁴	84,0	3,36·10 ⁺⁰⁵
2,70·10 ⁻⁰⁴	91,0	3,37·10 ⁺⁰⁵

Cuadro A.34 Datos obtenidos de tiempo en función del volumen para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya malla 50, agregando 1 ml de floculante + 15 ml de coagulante.

Volumen (m ³)	Tiempo (s)	t/V (s/m ³)
3,00·10 ⁻⁰⁵	10,0	3,33·10 ⁺⁰⁵
5,00·10 ⁻⁰⁵	19,0	3,80·10 ⁺⁰⁵
7,00·10 ⁻⁰⁵	29,0	4,14·10 ⁺⁰⁵
9,00·10 ⁻⁰⁵	42,0	4,67·10 ⁺⁰⁵
1,10·10 ⁻⁰⁴	51,0	4,64·10 ⁺⁰⁵
1,30·10 ⁻⁰⁴	62,0	4,77·10 ⁺⁰⁵
1,50·10 ⁻⁰⁴	75,0	5,00·10 ⁺⁰⁵
1,70·10 ⁻⁰⁴	87,0	5,12·10 ⁺⁰⁵
1,90·10 ⁻⁰⁴	100,0	5,26·10 ⁺⁰⁵
2,10·10 ⁻⁰⁴	113,0	5,38·10 ⁺⁰⁵
2,30·10 ⁻⁰⁴	129,0	5,61·10 ⁺⁰⁵
2,50·10 ⁻⁰⁴	144,0	5,76·10 ⁺⁰⁵
2,70·10 ⁻⁰⁴	164,0	6,07·10 ⁺⁰⁵

Cuadro A.35 Datos obtenidos de las aguas residuales para el cálculo de la resistencia específica y del medio filtrante para la filtración a presión atmosférica, utilizando bagacillo de cabuya #50.

Parámetro	Valor
Altura líquido (m)	0,031
Área búchner (m ²)	7,49·10 ⁻⁰³
Densidad (kg/m ³)	1015,5
Gravedad (m/s ²)	9,8
Temperatura (°C)	25
Viscosidad (m ² /s)	1,52·10 ⁻⁰⁶
ΔP (Pa)	308,83

Cuadro A.36 Datos obtenidos de las aguas residuales para el cálculo de la resistencia específica y del medio filtrante para la filtración a presión atmosférica, con floculante y coagulante utilizando bagacillo de cabuya #50.

Parámetro	Valor
Altura líquido (m)	0,031
Área búchner (m ²)	7,49·10 ⁻⁰³
Densidad (kg/m ³)	1350
Gravedad (m/s ²)	9,8
Temperatura (°C)	25
Viscosidad (m ² /s)	1,75·10 ⁻⁰⁶
ΔP (Pa)	410,55

B. RESULTADOS INTERMEDIOS

Cuadro B.1 Volumen de los porómetros.

Porómetro	Volumen del porómetro V_c (m^3)
A	$8,57 \cdot 10^{-04}$
B	$8,23 \cdot 10^{-04}$
C	$8,37 \cdot 10^{-04}$

Cuadro B.2 Porosidad y densidad aparente para el bagacillo de cabuya de malla tipo #8.

Corrida	Tipo de muestra	Porosidad ϵ (%)	Densidad aparente ρ_a (kg/m^3)
1	Nueva	75,21	85
2	Nueva	74,94	87
3	Nueva	73,40	78
4	Nueva	73,70	84
5	Nueva	71,92	78
6	Usada	71,93	72
7	Usada	72,87	73
8	Usada	73,85	71

Cuadro B.3 Porosidad y densidad aparente para el bagacillo de cabuya de malla tipo #20.

Corrida	Tipo de muestra	Porosidad ϵ (%)	Densidad aparente ρ_a (kg/m^3)
1	Nueva	74,49	91
2	Nueva	82,39	112
3	Nueva	72,35	95
4	Nueva	70,21	93
5	Nueva	68,56	97
6	Nueva	75,91	164
7	Nueva	74,12	168
8	Nueva	74,87	173
9	Usada	77,12	87
10	Usada	75,97	92
11	Usada	76,64	88

Cuadro B.4 Porosidad y densidad aparente para el bagacillo de cabuya de malla tipo #50.

Corrida	Tipo de muestra	Porosidad	Densidad aparente
		ε (%)	ρ_a (kg/m ³)
1	Nueva	77,08	174
2	Nueva	73,78	192
3	Nueva	78,20	158
4	Usada	76,73	128
5	Usada	78,35	124
6	Nueva	73,89	247
7	Nueva	73,90	229
8	Usada	76,97	155
9	Usada	77,78	193
10	Usada	77,93	165

Cuadro B.5 Peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #8.

Muestra	Peso específico P_e (kg/m ³)
1	984
2	941
3	809
4	761
5	785
6	804

Cuadro B.6 Peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #20.

Muestra	Peso específico P_e (kg/m ³)
1	818
2	887
3	858
4	1034
5	1032
6	1020

Cuadro B.7 Peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #50.

Muestra	Peso específico P_e (kg/m ³)
1	1250
2	1300
3	1260
4	1200
5	1240

Cuadro B.7 (Continuación). Peso específico para el bagacillo de cabuya de malla tipo #50.

Muestra	Peso específico P_e (kg/m^3)
6	1260

Cuadro B.8 Cálculo del promedio, desviación y varianza de la drenabilidad, porosidad, densidad y peso específico del bagacillo de cabuya de tipo de malla #8.

Parámetro	Porosidad ϵ (%)	Densidad aparente ρ_a (kg/m^3)	Drenabilidad V_a (m^3)	Peso específico P_e (kg/m^3)
Promedio	72,88	72	$4,32 \cdot 10^{-04}$	847
Desviación	0,96	0,001	2,52	0,0919
VARP	0,61	$1,1 \cdot 10^{-06}$	4,22	$7,0 \cdot 10^{-03}$

Cuadro B.9 Cálculo del promedio, desviación y varianza de la drenabilidad, porosidad, densidad y peso específico del bagacillo de cabuya de tipo de malla #20.

Parámetro	Porosidad ϵ (%)	Densidad aparente ρ_a (kg/m^3)	Drenabilidad V_a (m^3)	Peso específico P_e (kg/m^3)
Promedio	76,58	89	$3,92 \cdot 10^{-04}$	940
Desviación	0,58	0,003	12,49	0,098
VARP	0,22	$5,5 \cdot 10^{-06}$	104,00	$8,0 \cdot 10^{-03}$

Cuadro B.10 Cálculo del promedio, desviación y varianza de la drenabilidad, porosidad, densidad y peso específico del bagacillo de cabuya de tipo de malla #50.

Parámetro	Porosidad ϵ (%)	Densidad aparente ρ_a (kg/m^3)	Drenabilidad V_a (m^3)	Peso específico P_e (kg/m^3)
Promedio	77,56	171	$1,30 \cdot 10^{-04}$	1250
Desviación	0,516	0,020	2,00	0,0312
VARP	0,178	$2,6 \cdot 10^{-04}$	2,667	$8,1 \cdot 10^{-04}$

Cuadro B.11 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración al vacío utilizando bagacillo de cabuya de mallas 8, 20 y 50.

Prueba	Rendimiento malla	Rendimiento malla	Rendimiento malla
	# 8 (%)	#20 (%)	#50 (%)
Turbidez	5,38	6,18	6,95
DQO	7,07	7,43	13,97
Sólidos totales	21,26	22,0	24,56

Cuadro B.12 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración a presión atmosférica utilizando bagacillo de cabuya de mallas 8, 20 y 50.

Prueba	Rendimiento malla	Rendimiento malla	Rendimiento malla
	# 8 (%)	#20 (%)	#50 (%)
Turbidez	11,52	16,20	32,42
DQO	1,77	0,21	14,09
Sólidos totales	1,54	1,55	19,03

Cuadro B.13 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración al vacío y a presión atmosférica utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante, utilizando bagacillo de cabuya malla # 50.

Prueba	Rendimiento	Rendimiento
	filtración con vacío (%)	filtración a presión atmosférica (%)
Turbidez	10,16	34,75
DQO	14,21	35,64
Sólidos totales	11,32	22,19

Cuadro B.14 Datos obtenidos de porcentaje de rendimiento para las pruebas de turbidez, DQO y sólidos totales para la filtración al vacío y a presión atmosférica utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante, utilizando bagacillo de cabuya malla # 50.

Prueba	Rendimiento	Rendimiento
	filtración con vacío (%)	filtración a presión atmosférica (%)
Turbidez	5,73	29,03
DQO	11,04	24,07
Sólidos totales	3,55	35,65

Cuadro B.15 Datos de resistencia específica y resistencia del medio filtrante, para la filtración a presión atmosférica, utilizando bagacillo de cabuya malla # 50.

Parámetro	Valor
Resistencia específica de la torta (α) (m/kg)	$7,54 \cdot 10^{+09}$
Resistencia del medio filtrante (R_m) (m^{-1})	$6,12 \cdot 10^{+11}$

Cuadro B.16 Datos de resistencia específica y resistencia del medio filtrante, para la filtración a presión atmosférica, utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante en bagacillo de cabuya malla # 50.

Parámetro	Valor
Resistencia específica de la torta (α) (m/kg)	$1,07 \cdot 10^{+09}$
Resistencia del medio filtrante (R_m) (m^{-1})	$4,71 \cdot 10^{+11}$

Cuadro B.17 Datos de resistencia específica y resistencia del medio filtrante, para la filtración a presión atmosférica, utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante en bagacillo de cabuya malla # 50.

Parámetro	Valor
Resistencia específica de la torta (α) (m/kg)	$2,37 \cdot 10^{+09}$
Resistencia del medio filtrante (R_m) (m^{-1})	$6,12 \cdot 10^{+11}$

Cuadro B.18 Datos obtenidos para la elaboración del gráfico de probabilidad normal en la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya malla #50

Y	\hat{Y}	Residuos	Residuos ordenados	P	Z
433333	408557	24776	-15446	0,042	-1,73
420000	414557	5443	-7788	0,125	-1,15
428571	420557	8014	-5284	0,208	-0,81
411111	426557	-15446	-4557	0,292	-0,55
427273	432557	-5284	1338	0,375	-0,32
430769	438557	-7788	2384	0,458	-0,10
440000	444557	-4557	5443	0,542	0,10
452941	450557	2384	8014	0,625	0,32
457895	456557	1338	8872	0,708	0,55
471429	462557	8872	18400	0,792	0,81
486957	468557	18400	21443	0,875	1,15
496000	474557	21443	24776	0,958	1,73

Cuadro B.19 Datos obtenidos para la elaboración del gráfico de probabilidad normal en la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya malla #50 utilizando 0,5 ml de floculante y 15 ml de coagulante.

Y	\hat{Y}	Residuos	Residuos ordenados	P	Z
266667	276563	-9896	-11526	0,038	-1,77
280000	282563	-2563	-9896	0,115	-1,20
285714	288563	-2849	-6563	0,192	-0,87
300000	294563	5437	-6128	0,269	-0,62
300000	300563	-563	-3510	0,346	-0,40
307692	306563	1129	-2849	0,423	-0,19
313333	312563	770	-2563	0,500	0,00
317647	318563	-916	-1992	0,577	0,19
321053	324563	-3510	-916	0,654	0,40
328571	330563	-1992	-563	0,731	0,62
330435	336563	-6128	770	0,808	0,87
336000	342563	-6563	1129	0,885	1,20
337037	348563	-11526	5437	0,962	1,77

Cuadro B.20 Datos obtenidos para la elaboración del gráfico de probabilidad normal en la filtración a presión atmosférica del bagacillo de cabuya malla #50 utilizando 1 ml de floculante y 15 ml de coagulante.

Y	\hat{Y}	Residuos	Residuos ordenados	P	Z
333333	371125	-37792	-37792	0,038	-1,77
380000	391125	-11125	-15125	0,115	-1,20
414286	411125	3161	-13030	0,192	-0,87
466667	431125	35542	-11125	0,269	-0,62
463636	451125	12511	-10255	0,346	-0,40
476923	471125	5798	-4809	0,423	-0,19
500000	491125	8875	-3718	0,500	0,00
511765	511125	640	640	0,577	0,19
526316	531125	-4809	3161	0,654	0,40
538095	551125	-13030	5798	0,731	0,62
560870	571125	-10255	8875	0,808	0,87
576000	591125	-15125	12511	0,885	1,20
607407	611125	-3718	35542	0,962	1,77

C. MUESTRA DE CÁLCULO

C.1 Cálculo del volumen del porómetro

El cálculo del volumen del porómetro se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{\pi}{4} * D^2 * h \quad (C.1)$$

Para calcular el volumen se toman los datos del cuadro A.1, fila 2, columna 2 y los datos de la fila 2, columna 3:

$$V_c = \frac{\pi}{4} * (8,41 \cdot 10^{-2})^2 * 0,154 = 8,57 \cdot 10^{-4}$$

El resultado se encuentra tabulado en el cuadro B.1, fila 2, columna 2, el cálculo se hace análogamente para el resto de los volúmenes de los porómetros.

C.2 Cálculo del porcentaje de porosidad

El cálculo del porcentaje de porosidad se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{V_a + \frac{P_H - P_S}{P_a}}{V_c} * 100 \quad (C.2)$$

Para calcular el porcentaje de porosidad se toman los datos del cuadro A.2 fila 2, columna 6, 7 y 8 y los datos del cuadro B.1 fila 3, columna 2:

$$\frac{4,04 \cdot 10^{-4} + \left(\frac{0,285 - 0,070}{1000} \right)}{8,23 \cdot 10^{-4}} * 1000 = 75,21\%$$

El resultado se encuentra tabulado en el cuadro B.2, fila 2 columna 3, el cálculo se hace análogamente para el resto de los porcentajes de porosidad.

C.3 Cálculo de la densidad aparente

El cálculo de la densidad aparente se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{P_S}{V_c} \quad (C.3)$$

Para calcular la densidad aparente se toma el dato del cuadro A.2 fila 2, columna 7 y el dato del cuadro B.1 fila 3, columna 2:

$$\frac{0,070}{8,23 \cdot 10^{-4}} = 85$$

El resultado se encuentra tabulado en el cuadro B.2 fila 2, columna 4, el cálculo se hace análogamente para el resto de las densidades aparentes.

C.4 Cálculo del peso específico

El peso específico se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$P_e = \frac{P_M}{V_M} \quad (C.4)$$

Para calcular el peso específico se toman los datos del cuadro A.5 fila 2, columna 2 y 7:

$$\frac{0,01005}{1,021 \cdot 10^{-5}} = 984$$

El resultado se encuentra tabulado en el cuadro B.5 fila 2, columna 2.

El cálculo se hace análogamente para el resto de los pesos específicos.

C.5 Cálculo de la presión hidrostática

La presión hidrostática se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \rho * g * h \quad (C.5)$$

Para calcular la presión hidrostática se toman los datos del cuadro A.35 fila 2, 4 y 5 columna 2:

$$0,031 * 1015,15 * 9,81 = 308,83$$

El resultado se encuentra tabulado en el cuadro A.35 fila 8, columna 2.

El cálculo se hace análogamente para el resto de la presión hidrostática.

C.6 Cálculo de la resistencia específica del lecho

El cálculo de la resistencia específica del lecho se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{A^2 * \Delta P * K_c}{c * \mu} \quad (C.6)$$

Para el cálculo de la resistencia específica, se toman los datos del cuadro A.35 fila 3, 7 y 8, columna 2, los datos de la ecuación de la curva de la figura 4.2.6, el dato del cuadro A.18 fila 4, columna 2 y el dato del cuadro A.21 fila 4, columna 2:

$$\frac{(7,49 \cdot 10^{-3})^2 * 308,83 * 6 \cdot 10^{+08}}{(4780 - 3870) * 1,52 \cdot 10^{-6}} = 7,54 \cdot 10^{+09}$$

El resultado se encuentra en el cuadro B.15, fila 2, columna 2.

El cálculo se hace análogamente para el resto de las resistencias específicas.

C.7 Cálculo de la resistencia del medio filtrante

La resistencia del medio filtrante se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$R_m = \frac{A * \Delta P * \left(\frac{1}{q_0}\right)}{\mu} \quad (C.7)$$

Para el cálculo de la resistencia del medio filtrante, se toman los datos del cuadro A.35 fila 3, 7 y 8, columna 2, los datos de la ecuación de la curva de la figura 4.2.6:

$$R_m = \frac{7,49 \cdot 10^{-03} * 308,83 * 400966}{1,52 \cdot 10^{-06}} = 6,12 \cdot 10^{+11}$$

El resultado se encuentra en el cuadro B.15, fila 3, columna 2.

El cálculo se hace análogamente para el resto de las resistencias del medio filtrante.

C.8 Cálculo del porcentaje de rendimiento

El porcentaje de rendimiento se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Rendimiento} \left(\frac{\text{Valor inicial} - \text{Valor final}}{\text{Valor inicial}} \right) * 100 \quad (C.8)$$

Para el cálculo del porcentaje de rendimiento se toman los datos del cuadro A.8 fila 2 columna 2 y del cuadro A.9 fila 2, columna 2:

$$\left(\frac{12510 - 11836}{12510} \right) * 100 = 5,38\%$$

El resultado se encuentra en el cuadro B.11 fila 2, columna 2.

El cálculo se hace análogamente para el resto de los porcentajes de rendimiento.

ANEXOS



WETFloc 3010

Floculante

El WETFloc 3010

Es un floculante aniónico y no iónico en emulsión. Actúa de manera eficaz como ayudante de coagulación y acondicionador de lodo en procesos de separación de líquido-sólido en una amplia gama de industrias.

Está recomendado para:

- Ayudante de coagulación.
- Flotación por medio de aire disuelto.
- Filtración
- Sedimentación por gravedad.
- Deshidratación mecánica.
- Remoción de fósforo.
- Modificador de la viscosidad.
- Clarificación del agua.

Beneficios

- Uso económico: eficaz a bajas dosis.
- Remoción de sólidos altamente eficaz.
- Efectivo en un amplio rango de pH, no modifica el pH del sistema.
- Elimina o reduce el uso de sales inorgánicas.
- Altas velocidades de sedimentación.

Seguridad e higiene

Para una información completa en Seguridad, Salud y Medio Ambiente refiérase a la Hoja de Datos de Seguridad antes del manejo de estos materiales.

Manipulación y almacenamiento

Los materiales recomendados para la construcción de recipientes incluyen el acero inoxidable, la fibra de vidrio, el plástico, con recubrimientos epóxicos o de vidrio. No utilice hierro, cobre ni aluminio. Para mejores resultados evite el congelamiento. Si el producto se congela, descongele completamente y mézclelo antes de usarlo.

Dosificación del producto

Antes de su uso inicial, agite por completo utilizando un agitador de bajas revoluciones (<475 rpm) o una bomba de recirculación para garantizar la uniformidad. Las soluciones de trabajo recomendadas son una concentración del 0,5%; sin embargo, las soluciones madre pueden prepararse con una concentración de hasta el 2% mediante unidades de preparación automatizadas, o bien por lotes.

Las soluciones se deben dejar afejar 30 minutos para lograr la máxima eficacia. Para la preparación se debe utilizar agua de alta calidad. El agua de dilución secundaria se puede añadir a la solución de madre antes del punto de dosificación para mejorar la mezcla con el sustrato. Se recomienda una relación de al menos 10:1. Se recomienda utilizar un anillo o cabezal de distribución en la corriente de tratamiento. Evite usar bombas centrífugas para la transferencia del polímero.

Distribución

Estos productos se distribuyen en tambores de 200 litros, contenedores de 1000 litros. Calidad y normatividad Para información sobre el listado del Control del Inventario Químico, consulte la Hoja de Datos de Seguridad del producto. Para mas información vea la sección de normas aprobadas.

Confiamos que la información arriba sea de su interés. Está basada en datos y conocimientos considerados correctos y exactos, que son ofrecidos a los usuarios para su uso personal en investigación y control. Sin embargo, si las condiciones de su uso estuvieran fuera de nuestra supervisión, no podremos garantizar los resultados obtenidos. Le agradecemos tomar en Consideración todas las informaciones, recomendaciones y sugerencias junto con nuestras condiciones generales de venta, incluso aquellas que limitan las garantías aplicables a todos los productos que **PROVEEMOS**. Ninguna información, recomendación o sugerencia debe ser interpretada de modo a violar o desobedecer cualquiera norma o disposición legal corriente o derechos pertenecientes a terceros.

FABRICADO POR:

CHEMICOACHING LTDA

Calle 79 No. 68 G 15

Teléfono.: 57-1- 2 31 47 59 – Fax No. 57 -1- 6 60 65 38

Bogotá – Colombia.



WETFloc 3620

Coagulante de Aluminio

El WETFloc 3620

Es un polihidroxicloriguro de aluminio en presentación líquida. Es un coagulante eficiente para el tratamiento de agua potable y residual; tanto municipal como industrial.

Es un coagulante de aluminio prepolimerizado usado en dosis bajas lo que reduce el volumen de lodos generados y la necesidad de ajustar el pH. El WETFloc también mejora la filtración del agua sedimentada; ofreciendo mayor tiempo entre retrolavados y una alta remoción de color turbiedad, con menor consumo de alcalinidad.

ESPECIFICACION DEL PRODUCTO

Apariencia	Líquido transparente a ligeramente turbio
Aluminio	12.2 ± 0.5 %
Al ₂ O ₃	23.0 ± 1.0 %
Hierro (Fe)	< 0.03 %
Basicidad	80 ± 5 %
Gravedad esp.	$1.32 \text{ g/cm}^3 \text{ min.}$
Rango pH	2.0 – 4.0

Almacenaje

El 3620 debe ser almacenado en un lugar accesible en contenedores de fibra de vidrio o en tanques de polietileno.

Dosificación

El 3620 se dosifica en bombas de diafragma con calibración y resistentes a la corrosión, el producto normalmente se dosifica sin dilución.

Manejo seguro

Usar ropa apropiada de protección, guantes y protección de ojos/rostro. En caso de contacto con los ojos se debe lavar suavemente con abundante agua. En caso de emergencia llamar a la autoridad correspondiente.

Empaque

WETFloc 3620 es empacado en recipientes de polietileno de alta densidad de 200 litros

Seguridad y manejo

Todo producto químico exige precauciones en cuanto a su manejo, almacenaje y desecho. Recomendamos la lectura atenta de la Ficha de Seguridad y cumplimiento de las instrucciones contenidas en ella.

* Confiamos que la información presentada arriba sea de su interés. Está basada en datos y conocimientos considerados correctos y exactos, que son ofrecidos a los usuarios para su uso personal en investigación y control. Sin embargo, si las condiciones de su uso estuvieran fuera de nuestra supervisión, no podremos garantizar los resultados obtenidos. Le agradecemos tomar en consideración todas las informaciones, recomendaciones y sugerencias junto con nuestras condiciones generales de venta, incluso aquellas que limitan las garantías aplicables a todos los productos que proveemos. Ninguna información, recomendación o sugerencia debe ser interpretada de modo a violar o desobedecer cualquiera norma o disposición legal corriente o derechos pertenecientes a terceros.

FABRICADO POR:

CHEMICOACHING LTDA

Calle 79 No. 68 G 15

Teléfono.: 57-1- 2 31 47 59 – Fax No. 57 -1- 6 60 65 38

Bogotá – Colombia.