

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA



**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA ACELERADO DE EVAPORACIÓN FORZADA
COMO ALTERNATIVA PREVENTIVA DE IMPACTO AMBIENTAL
DEL PASIVO LICOR CÁUSTICO PROCEDENTE DEL PROCESO BAYER**

**Trabajo Especial de Grado presentado
ante la ilustre Universidad Central de
Venezuela por la Br. Leidy Pernía para
optar a título de Licenciada en Química.**

Caracas, Mayo 2013.

Yo, Prof. Paulino Betancourt, Jefe del Departamento de Tecnología Química de la Universidad Central de Venezuela y el Ms.c. Miguel A. Pérez Investigador Asociado de PDVSA-Intevep.

Certificamos que, el presente Trabajo Especial de Grado, Titulado:

**“EVALUACIÓN DE UN SISTEMA ACELERADO DE EVAPORACIÓN FORZADA
COMO ALTERNATIVA PREVENTIVA DE IMPACTO AMBIENTAL
DEL PASIVO LICOR CÁUSTICO PROCEDENTE DEL PROCESO BAYER”**

Que presenta la Br. Leidy Pernía M. C.I: V-18.738.218., para aspirar al título de Licenciada en Química, ha sido realizado en los laboratorios de PDVSA-Intevep, bajo nuestra dirección, durante los años 2012 y 2013, y con esta fecha autorizamos su presentación.

Caracas, 7 de Mayo de 2013.

Ms.c. Miguel A. Pérez
(Tutor Industrial)

Dr. Paulino Betancourt
(Tutor Académico)

Los abajo firmantes designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “Evaluación de un sistema acelerado de evaporación forzada como alternativa preventiva de impacto ambiental del pasivo licor cáustico procedente del proceso Bayer”. Presentado por la Br. Leidy Pernía, C.I: V-18.738.218. Certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudio para optar al título de Licenciada en Química.

Ms.c. Miguel A. Pérez

(Tutor Industrial)

Dr. Paulino Betancourt

(Tutor académico)

Dr. José Biomorgi

(Jurado)

Dr. Santiago Marrero

(Jurado)

“Ser químico te da herramientas para entender grandes fenómenos que ocurren en nuestro planeta y como científicos sentirnos curiosos y buscar el ¿Por qué? de las grandes incógnitas del universo, sin embargo, no somos nosotros ni el medio ambiente inmunes a nuestro trabajo”.

AGRADECIMIENTOS

Agradecida principalmente con Dios, por darme un día más de vida y permitirme tener la familia más hermosa y unida. Por gozar de salud y poder estudiar y alcanzar el gran sueño de ser Licenciada en Química.

A mis Padres y hermana, Rafael Pernía, Laura Muro y Lesly Pernía, por su apoyo incondicional en pro de alcanzar mis metas propuestas; por ustedes soy quien soy. Pero muy especialmente a mi Madre, por ser una mujer luchadora, trabajadora, responsable, de valores y la persona que más admiro en mi vida... Por luchar conmigo, apoyarme, aconsejarme y estar a mi lado en cada paso que doy. A mis abuelos, tías y primos y especialmente a mi tío, Luis A. Muro, por ser como un padre para mí, por su amor y apoyo, y por estar presente en cada momento importante de mi vida. A César Guerra, por estar a mi lado, quererme, acompañarme y brindarme todo su apoyo.

Agradecida con PDVSA-Intevep por abrirme sus puertas, confiarme éste gran trabajo de investigación y brindarme la oportunidad de desarrollarme como investigadora para aportar un trabajo en beneficio de mi país. A mis tutores, Dr. Paulino Betancourt y especialmente al Ms.C. Miguel A. Pérez, por sus grandes ideas, por ser el guía de un gran proyecto y el apoyo prestado en la continuación del trabajo realizado.

Mis más profundos agradecimientos van dirigidos a la Universidad Central de Venezuela "*La Casa que Vence las Sombras*", Facultad de Ciencias y Profesores. Por su contribución en mi formación académica y profesional, darme las herramientas para enfrentar los retos que la vida me pueda dar y hacerme sentir orgullosa de ser UCVista. Finalmente, pero no menos importante, a todos mis amigos (Verónica Hergueta, Jeniree Velázquez, Mónica Mancebo, Aryday Ramos, Laura Ordoñez, Nelson Acevedo, Quimberly Cuenca y Jorge Salazar) que me acompañaron en este camino y fuimos una familia dentro y fuera de la facultad de Ciencias.

Resumen

El licor cáustico es uno de los dos residuos generados en la obtención de alúmina a través del proceso Bayer, los cuales son dispuestos en lagunas para su contención y evaporación natural. Debido a la alcalinidad del licor cáustico de 145007 ppm de carbonato de sodio, éste se convirtió en un pasivo ambiental altamente peligroso para los ecosistemas acuáticos y las poblaciones aledañas. Es por ello que en el presente trabajo especial de grado se plantea un sistema de evaporación acelerada y forzada, con la finalidad de aumentar la tasa de evaporación del licor cáustico a través de la incorporación paneles de evaporación y viento artificial.

La capacidad de evaporación máxima del sistema modelado en el experimento donde se simuló viento y radiación solar fue de 0,302 mm/h (2645,52 mm/año). La radiación provocó un aumento de la temperatura que incrementó la energía interna del líquido e hizo que aquellas moléculas que adquirieron la energía necesaria pasaran a la fase vapor saturando las capas de aire que fueron renovadas con el viento. En comparación con los experimentos donde sólo se aplicó viento y donde no se simuló ningún factor meteorológico, se obtuvo una tasa de evaporación máxima de 0,196 mm/h (1716,96 mm/año) y 0,146 mm/h (1278,96 mm/año) respectivamente.

El sistema constó de un aspersor MONARCH F-80, que permitió obtener pequeñas partículas del líquido que fueron esparcidas sobre el panel, que por su diseño, aumentó el área superficial hasta 56,8854 m² generando una película más fina sobre el mismo y por lo tanto ocurrió mayor absorción de energía.

Las sales obtenidas de los experimentos donde se simuló viento y radiación solar fueron identificadas como carbonato de sodio heptahidratado, con las cuales se sintetizó percarbonato de sodio para ser empleado en Procesos de Oxidación Avanzada (POA'S) en aguas contaminadas dentro de la industria petrolera.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	MARCO TEÓRICO	4
2.1	Generalidades.....	5
2.2	Proceso Bayer	8
2.2.1	Área de manejo de materiales	10
2.2.2	Sección: Lado rojo	10
2.2.3	Sección: Lado blanco.....	12
2.2.4	Importancia del área de digestión	14
2.3	Desechos del proceso Bayer para la obtención de alúmina.....	15
2.3.1	Lodo rojo.....	15
2.3.2	Licor cáustico	16
2.3.3	Hidróxido de sodio.....	16
2.3.4	Carbonato de sodio (Na_2CO_3).....	17
2.4	Impacto del licor cáustico sobre el ambiente.....	17
2.5	Evaporación natural	20
2.6	Evaporación acelerada	21
2.6.1	Sistemas de evaporación acelerada	22
2.6.2	Descripción del sistema.....	23
2.7	Evaporación forzada	25
2.8	Factores meteorológicos y climatológicos que influyen en la evaporación.....	26
2.8.1	Radiación solar	27

2.8.2	Humedad	27
2.8.3	Viento.....	29
2.8.4	Temperatura	30
2.9	Datos climatológicos de Puertos Ordaz, Estado Bolívar, Venezuela.....	30
2.10	Métodos para estimar la evaporación	31
2.10.1	Evaporación desde superficies libres (lagos o lagunas)	31
2.11	Pérdidas por evaporación y arrastre del viento	35
2.12	Transferencia de calor	36
2.12.1	Conducción	37
2.12.2	Convección	37
2.12.3	Radiación	38
2.13	Percarbonato de sodio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$)	39
3.	ANTECEDENTES	40
4.	OBJETIVOS	45
4.1	Objetivo General.....	46
4.2	Objetivos Específicos.....	46
5.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	47
5.1	Medición del pH	48
5.2	Determinación de la alcalinidad del licor cáustico.....	48
5.3	Determinación de la densidad del licor cáustico	49
5.4	Análisis de la disminución de la conductividad del licor cáustico para acelerar el proceso de formación de cristales de carbonato en el sistema de evaporación.....	50

5.5	Determinación de los hábitos cristalinos más estables del carbonato de sodio (Na_2CO_3) por evaporación en horno.....	52
5.6	Evaluación del sistema acelerado de evaporación forzada	53
5.7	Equipo y materiales.....	55
5.7.1	Laguna.....	55
5.7.1.1	Cálculo de las áreas	56
5.7.2	Panel.....	57
5.7.3	Porta-panel.....	58
5.7.4	Aspersor	59
5.7.4.1	Cálculo del caudal.....	60
5.7.5	Bomba Peristáltica	60
5.7.6	Medidor de Velocidad del viento	61
5.8	Dispositivos para simular los factores meteorológicos	62
5.9	Medición de la velocidad del viento	62
5.10	Medición de la Radiación.....	63
5.11	Capacidad de evaporación del sistema modelado	63
5.12	Determinación de la concentración del licor cáustico a través del índice de refracción.....	64
5.13	Análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés).....	65
5.14	Síntesis del percarbonato de sodio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$)	66
5.14.1	Determinación de oxígeno disuelto en $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$	67
5.15	Análisis por Difracción de Rayos X (DRX)	70
5.16	Análisis por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	70

6. RESULTADOS Y DISCUSION	71
6.1 Alcalinidad y pH del licor cáustico	72
6.2 Determinación de la densidad del licor cáustico	74
6.3 Análisis de la disminución de la conductividad del licor cáustico para acelerar el proceso de formación de cristales de carbonato en el sistema de evaporación.....	76
6.4 Determinación de los hábitos cristalinos más estables del carbonato de sodio (Na_2CO_3) por evaporación en horno.....	77
6.5 Determinación de las áreas y volumen de la laguna	90
6.5.1 Determinación de la capacidad de la laguna de evaporación a escala real.....	91
6.6 Medición del caudal de los aspersores	91
6.7 Evaluación de la capacidad de evaporación del sistema modelado	92
6.7.1 Experimento 1. Medición de la evaporación sin viento y sin radiación.....	92
6.7.2 Experimento 2. Medición de la evaporación con viento y sin radiación.....	95
6.7.3 Experimento 3. Medición de la evaporación con viento y radiación	103
6.8 Análisis Termogravimétrico de las sales obtenidas del experimento 3: con viento y radiación	112
6.8.1 Análisis termogravimétrico de una muestra de carbonato de sodio pura	112
6.8.2 Análisis termogravimétrico de sales recolectadas del panel de vaporación.....	114
6.8.3 Análisis termogravimétrico de sales recolectadas de la laguna	118
6.9 Síntesis del percarbonato de sodio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$).....	121

	6.10 Determinación de oxígeno disuelto en $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$	123
7.	CONCLUSIONES	125
8.	RECOMENDACIONES	128
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
10.	APÉNDICE	136

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Composición de la bauxita provenientes de los Pijiguos	7
Tabla 2.	Composición del lodo rojo generados por Interálumina	16
Tabla 3.	Datos meteorológicos de Puerto Ordaz, Venezuela.....	31
Tabla 4.	Determinación de la concentración de CO_3^{2-} y HCO_3^- en el agua destilada y alcalinidad como CaCO_3 y Na_2CO_3	72
Tabla 5.	Determinación de la concentración de CO_3^{2-} , HCO_3^- y OH^- en el licor cáustico y alcalinidad como CaCO_3 y Na_2CO_3	72
Tabla 6.	pH del licor cáustico	73
Tabla 7.	Obtención de los hábitos cristalinos más estables del carbonato de sodio	78
Tabla 8.	Porcentajes de elementos identificados en la muestra de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a 30°C	82
Tabla 9.	Porcentajes de elementos identificados en la muestra de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a 32°C	85
Tabla 10.	Diagrama de fases del carbonato de sodio.	88
Tabla 11.	Determinación de las áreas y volumen de la laguna.	90
Tabla 12.	Escala volumétrica de la laguna de evaporación de licor cáustico ..	91
Tabla 13.	Máximos y mínimos de los resultados teóricos y experimentales de los ensayos 1 y 2 para el experimento 1: sin viento y sin radiación	94
Tabla 14.	Máximo y mínimo de los resultados teóricos y experimentales de los ensayos 1, 2 y 3 para el experimento 2: con viento y sin radiación	98
Tabla 15.	Cristales recolectados del proceso de evaporación del experimento 2.....	100

Tabla 16.	Máximo y mínimo de los resultados teóricos y experimentales de los ensayos 1, 2 y 3 para el experimento 3: con viento y radiación	106
Tabla 17.	Cristales recolectados del proceso de evaporación del experimento 3	107
Tabla 18.	Oxígeno disuelto en $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$	123
Tabla 19.	Oxígeno disuelto en el producto comercial Nevex.	124

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Muestra de bauxita	5
Figura 2. Estructura cristalina de la gibbsita	6
Figura 3. Esquema del proceso Bayer para la obtención de alúmina	9
Figura 4. Digestión de la bauxita y operaciones de intercambio de calor	14
Figura 5. Proximidad de la laguna de licor cáustico al río Orinoco	19
Figura 6. Lagunas artificiales de licor cáustico y lodo rojo	20
Figura 7. Proceso que acelera el intercambio aire-agua.....	23
Figura 8. Sistema de evaporación acelerada.....	24
Figura 9. Revestimiento para un vertedero de desechos tóxicos seguro.....	25
Figura 10. Sistema de evaporación forzada	26
Figura 11. Gráfica del contenido de humedad en el aire a la presión de una atm de presión.....	29
Figura 12. Área sometida al estudio de vulnerabilidad. Playa Laguna de Punta Cuchillo/Frente al Dique 9	44
Figura 13. Sistemas de evaporación natural acelerado como una alternativa de tratamiento de riles vitimínicos.	43
Figura 14. pH-metro Hemo Electron Corporation, modelo Orion 4 STAR	48
Figura 15. Determinación de la densidad de una muestra de licor cáustico	50
Figura 16. Esquema del procedimiento experimental para el estudio de la disminución de la conductividad del licor cáustico	51
Figura 17. Horno microondas para la evaporación del licor cáustico marca Microwave Muffle Furnace, modelo Phoenix.....	52
Figura 18. Procedimiento para la determinación de los hábitos cristalinos del carbonato de sodio por evaporación en horno.....	53

Figura 19. Esquema del sistema acelerado de evaporación forzada	54
Figura 20. Sistema real acelerado de evaporación forzada.....	54
Figura 21. Diseño esquemático de la laguna de licor cáustico y dimensiones	55
Figura 22. Laguna de licor caustico construida en acero inoxidable.....	56
Figura 23. Diseño esquematizado del panel alveolar	58
Figura 24. Panel alveolar construido en acero inoxidable.....	58
Figura 25. Diseño esquematizado del Porta-panel y sus dimensiones.....	59
Figura 26. Porta – panel construido en Plexiglás.....	59
Figura 27. Aspersor MONARCH F-80.....	60
Figura 28. Bomba peristáltica	60
Figura 29. Anemómetro	61
Figura 30. Radiómetro	61
Figura 31. Medidor de humedad relativa/temperatura	61
Figura 32. Lámpara (Simulación de radiacion)	62
Figura 33. Ventilador (Simulacio del viento)	62
Figura 34. Esquema para la medición de la velocidad del viento	62
Figura 35. Esquema para la medición de la radiación.....	63
Figura 36. Experimento 1.....	63
Figura 37. Experimento 2.....	63
Figura 38. Experimento 3.....	64
Figura 39. Medicion del índice de refracción	65
Figura 40. Analisis termogavimétrico	66
Figura 41. Procedimiento experimetal para la síntesis de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$	67

Figura 42. Medidor de oxígeno disuelto, Modelo YSI 5000	68
Figura 43. Procedimiento experimental para la medición de oxígeno disuelto.....	69
Figura 44. Equipo de Difracción de Rayos X, X'Pert Pro de PANalytical.....	70
Figura 45. Microscopio electrónico de barrido FEI, QUANTA FEG 250.....	70
Figura 46. Efecto del pH en la composición de especies carbonatadas en soluciones acuosas.....	74
Figura 47. Concentración de Carbonato de sodio dado por la densidad y la temperatura.....	75
Figura 48. Disminución de la conductividad del licor cáustico por agregado de etanol.....	76
Figura 49. Resultados de DRX de muestra de sales de la evaporación en horno a 27°C.....	79
Figura 50. Resultados de DRX de muestra de sales de la evaporación en horno a 30°C.....	80
Figura 51. MEB de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ obtenidas a 27 °C.	80
Figura 52. MEB de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ obtenidas a 30 °C.	81
Figura 53. Analisis EDS de rayos X de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a 30°C.....	82
Figura 54. Resultados de DRX de muestra de sales de la evaporación en horno 32°C. Ensayo 1.....	83
Figura 55. Resultados de DRX de muestra de sales de la evaporación en horno a 32°C. Ensayo 2.....	83
Figura 56. MEB de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ obtenidas a 32°C.	84
Figura 57. Análisis EDS de rayos X de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a 32°C.....	85
Figura 58. Resultados de DRX de muestra de sales de la evaporación en horno a 40°C.....	86

Figura 59. MEB de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ obtenidas a 40 °C.	86
Figura 60. Resultados de DRX de muestra de sales de la evaporación en horno a 100°C.....	87
Figura 61. Diagrama de fases del carbonato de sodio.....	89
Figura 62. Tasas de evaporación sin viento y sin radiación. Ensayo 1.....	93
Figura 63. Tasas de evaporación sin viento y sin radiación. Ensayo 2.....	93
Figura 64. Concentración del licor cáustico del experimento 1. Ensayo 1 y 2.....	95
Figura 65. Medición de la velocidad del viento	96
Figura 66. Tasas de evaporación con viento y sin radiación. Ensayo 1.....	96
Figura 67. Tasas de evaporación con viento y sin radiación. Ensayo 2.....	97
Figura 68. Tasas de evaporación con viento y sin radiación. Ensayo 3.....	97
Figura 69. Concentración del licor cáustico del experimento 2. Ensayo 1, 2 y 3.....	99
Figura 70. Análisis de DRX de muestras de sales recolectadas de la laguna para un sistema sólo con viento.....	100
Figura 71. Análisis de DRX de muestras de sales recolectadas del panel para un sistema sólo con viento.....	101
Figura 72. Sales producto de la evaporación del experimento 2.	102
Figura 73. MEB de sales obtenidas de la laguna del experimento 2	103
Figura 74. Medición de la Radiación.....	104
Figura 75. Tasas de evaporación con viento y radiación. Laguna 3. Ensayo 1.....	104
Figura 76. Tasas de evaporación con viento y radiación. Laguna 3. Ensayo 2.....	105

Figura 77. Tasas de evaporación con viento y radiación. Laguna 2. Ensayo 3.....	105
Figura 78. Análisis de DRX de muestras de sales recolectadas de la laguna para un sistema con viento y radiación.	108
Figura 79. Análisis de DRX de muestras de sales recolectadas del panel para un sistema con viento y radiación.....	108
Figura 80. Sales producidas de la evaporación del Experimento 1.	109
Figura 81. Concentración del licor cáustico del Experimento 2. Ensayo 1, 2 y 3.	110
Figura 82. MEB de sales obtenidas del panel de evaporación del experimento 3.	111
Figura 83. Sales obtenidas de la laguna y panel de evaporación.	112
Figura 84. Análisis termogravimétrico de una muestra de Na_2CO_3 al 99,9% de pureza.....	113
Figura 85. Análisis termogravimétrico de una muestra de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ procedente del panel de evaporación.....	115
Figura 86. Variación del diferencial calorimétrico en la deshidratación del carbonato de sodio heptahidratado recolectado del panel.....	116
Figura 87. Evidencia de la pérdida de peso en el TGA de las sales obtenidas del panel.....	117
Figura 88. Análisis termogravimétrico de una muestra de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ procedente de la laguna evaporación.....	119
Figura 89. Evidencia de la pérdida de peso en el TGA de las sales obtenidas de la laguna.....	120
Figura 90. $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ sintetizado de las sales obtenidas de la evaporación.	121
Figura 91. $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ en solución acuosa.	122

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La actividad industrial relacionada con el sector metalúrgico, es reconocida en el ámbito mundial como una potencia de impacto ambiental por la variedad de efluentes de descargas de líquidos, sólidos y gaseosos que pueden generar. En el caso particular de la industria del aluminio, se generan una serie de compuestos contaminantes, en mayor medida provenientes del proceso Bayer.

El proceso Bayer para la obtención de alúmina inicia cuando se lleva a cabo la digestión de la bauxita en solución de hidróxido de sodio (NaOH), seguido de la separación de la alúmina del resto de los metales, generando residuos industriales altamente alcalinos tales como: lodos rojos y licor cáustico. La alta alcalinidad de estos residuos se debe principalmente al carbonato de sodio, bicarbonato de sodio e hidróxido de sodio.

Durante la obtención de alúmina se requiere de grandes extensiones de terreno para la disposición de residuos altamente alcalinos, lo cual genera alteración de los niveles de pH de los suelos e inhibe la obtención de productos agrícolas. Se incrementa el riesgo de lixiviación en suelos no adecuados para la retención de residuos, contaminando aguas subterráneas y dificultando los tratamientos de remediación posterior. En el caso de vertidos de desechos hacia el cauce de un río, altera la calidad de las aguas y aumenta los niveles de corrosión, produciendo la destrucción de fauna y flora e impide su uso y consumo.

Como consecuencia de los efectos negativos hacia el ambiente generados por los desechos del proceso Bayer, se han realizado importantes esfuerzos por aplicar la ley Orgánica de Ambiente, a fin de lograr implementar políticas en los diferentes ámbitos del Estado, donde se conciba el crecimiento económico estrechamente relacionado con el uso racional de los recursos naturales y con el sostenimiento del equilibrio ambiental. Hasta ahora las acciones emprendidas se han orientado en aumentar la vida útil de las

lagunas receptoras, a través de la elevación de los diques; a disminuir la cantidad de agua que llega a las mismas y a la construcción de más canales de recolección del sobrenadante (filtrado) de las lagunas, alrededor de todo el dique de contención.

En base a la problemática generada por la alta alcalinidad de los residuos que provoca la obtención de alúmina en el proceso Bayer y los efectos perjudiciales hacia el ambiente, se propone un sistema acelerado de evaporación forzada, con la finalidad de minimizar el volumen del efluente líquido a cero a través de la evaporación del agua y así concentrar las sales de carbonato e hidróxido para darles una utilización en otras aplicaciones industriales.

2. MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

La bauxita (Figura 1) es el término genérico con el que se denomina a una mezcla natural de minerales ricos en óxidos de aluminio y es la materia prima de la cual se extrae prácticamente toda la alúmina utilizada en la producción de aluminio primario. ^[1]



Figura 1. Muestras de bauxita ^[1]

La bauxita, de origen supergénico, se origina corrientemente en condiciones tropicales o subtropicales por enriquecimiento de la concentración de minerales y por la meteorización de calizas que contienen arcillas. ^[2]

La gibbsita o hidrargillita suele ser el mineral predominante de la bauxita. La estructura cristalina ideal está formada por capas octaédricas, en las que el aluminio ocupa el centro de los octaedros, unidos lateralmente por sus aristas, dando una celdilla octogonal (pseudo-hexagonal) como se muestra en la Figura 2.

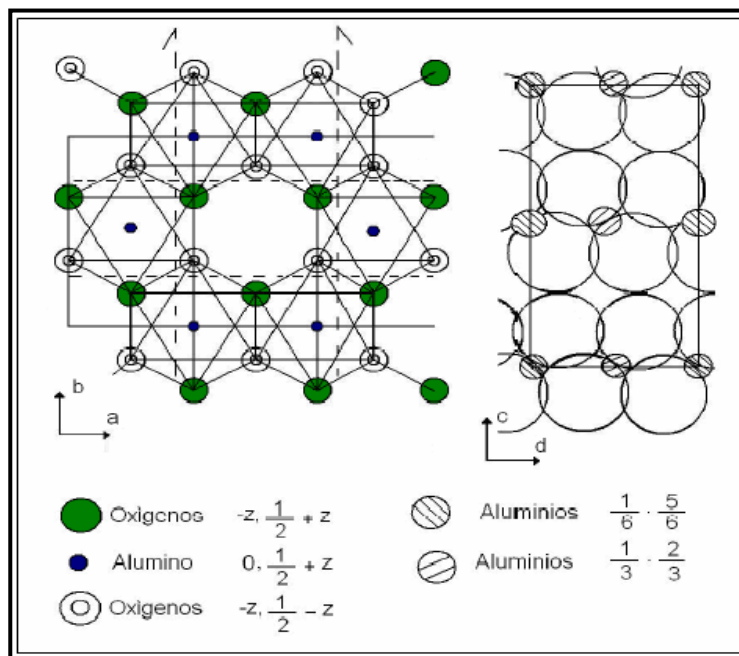


Figura 2. Estructura cristalina de la gibbsita ^[3]

Cada capa se compone de dos láminas de grupos hidroxilos (OH^-), con los átomos de aluminio entre ambas. Generalmente la estructura ideal aparece distorsionada debido a que los octaedros Al-O no son regulares. ^[3]

Los cristales de gibbsita muestran frecuentemente una cierta presencia de óxido ferroso (Fe_2O_3) y otros cationes, que sustituyen al aluminio en la estructura. El contenido de aluminio en la gibbsita es cercano al 45%. En la bauxita también se encuentran ciertas impurezas comunes; en la Tabla 1 se observa su composición. ^[4]

Tabla 1. Composición de la bauxita proveniente de los Pijiguaos ^[4]

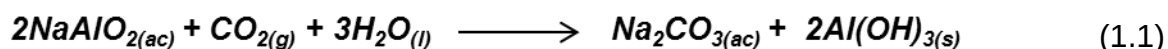
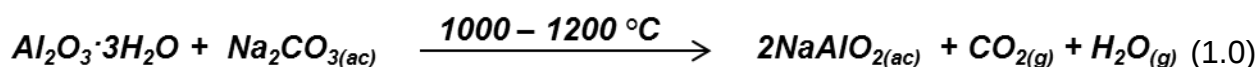
Composición de la Bauxita			
Minerales de Aluminio		Minerales de Titanio	
Gibbsita	$\alpha\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ $\gamma\text{Al}(\text{OH})_3$	Anatasa	TiO_2
Bohemita	$\alpha\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\gamma\text{AlO}(\text{OH})$	Rutilo	TiO_2
Diáspora	$\alpha\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\beta\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Ilmenita	FeTiO_3
		Leucoxeno	Producto de alteración de la ilmenita
Minerales de hierro		Minerales de Silicio	
Hermatitas	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	Caolinita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Goethita	$\alpha\text{FeO}(\text{OH})$	Cuarzo	SiO_2
Hermatitas alumínicas	$(\text{AlFe})_2\text{O}_3$	Otros	Pirita, marcasita, clorita, circón, cromita, piroxeno, halloysita, mica, apatita, corindón y minerales orgánicos.
Goethita alumínica	$(\text{AlFe})\text{OOH}$		
Magnetita	γFeO_4		
Ilmenita	FeTiO_3		

Debido a su elevada reactividad química, el aluminio nunca se encuentra en la naturaleza como aluminio metálico, sino que se encuentra en su forma oxidada principalmente como silicatos y los productos de su meteorización, las arcillas. Otros compuestos importantes incluyen los óxidos hidratados, un grupo que contiene a la bauxita, la materia prima para la producción de aluminio primario.

Los tres minerales más comunes de la bauxita son gibbsita, bohemita y diáspora. La primera forma es un óxido trihidratado, mientras que las dos últimas son formas monohidratadas.

2.2 Proceso Bayer

Anteriormente, la alúmina (Al_2O_3) se producía por el principio de Le Chatelier, donde se mezclaba la bauxita con carbonato sódico y se sometía la mezcla a calcinación en un horno entre 1000-1200 °C, proceso pirogénico. Como producto de reacción se obtenía aluminato sódico, de la que se precipitaba la alúmina por medio de dióxido de carbono (CO_2) procedente del horno. La base del proceso es:



El trihidrato filtrado se calcinaba a alúmina en un horno rotativo a alta temperatura, 1100-1200 °C. El carbonato de sodio (Na_2CO_3) se concentraba en los licores hasta que precipitaba la sal. El problema de este proceso es que no sólo se obtiene aluminato sódico, sino también silicato y titanio, lo que produce impurificaciones del hidrato. ^[4]

Poco tiempo después de presentarse las patentes del proceso Hall-Hérout para la obtención del aluminio, en 1889, Karl Josef Bayer patentó el proceso de obtención de alúmina, y hoy en día sigue siendo el más económico en uso para su extracción de la bauxita. El proceso Bayer depende de la variación de la solubilidad del hidróxido de aluminio existente en la bauxita con una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) a alta temperatura y de la insolubilidad de minerales remanentes. ^[5]

En Venezuela, Estado Bolívar, se emplea el proceso Bayer para la extracción de alúmina iniciando con la digestión de la bauxita en una solución de NaOH a una temperatura alrededor de 140 °C y una presión de 4 atm, respecto a la presión atmosférica. El residuo insoluble es separado por un proceso de decantación y

filtración. La solución con alto contenido de aluminato sódico (NaAlO_2) y libre de contaminantes es enviada al área de precipitación, en donde se agregan cristales de hidróxido de aluminio, generalmente, fino y en cantidad controlada para conseguir el tamaño de partícula de tenor industrial deseado. Después, el hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) es lavado y se somete a secado y calcinación para obtener el producto final, la alúmina, con apariencia de un polvo blanco. [6]

El proceso Bayer comprende tres grandes áreas en la operadora de alúmina: el área de manejo de materiales, el lado rojo y el lado blanco. Las diferentes operaciones y etapas que se llevan a cabo durante el proceso Bayer para la producción de alúmina se presentan esquematizadas en la Figura 3.

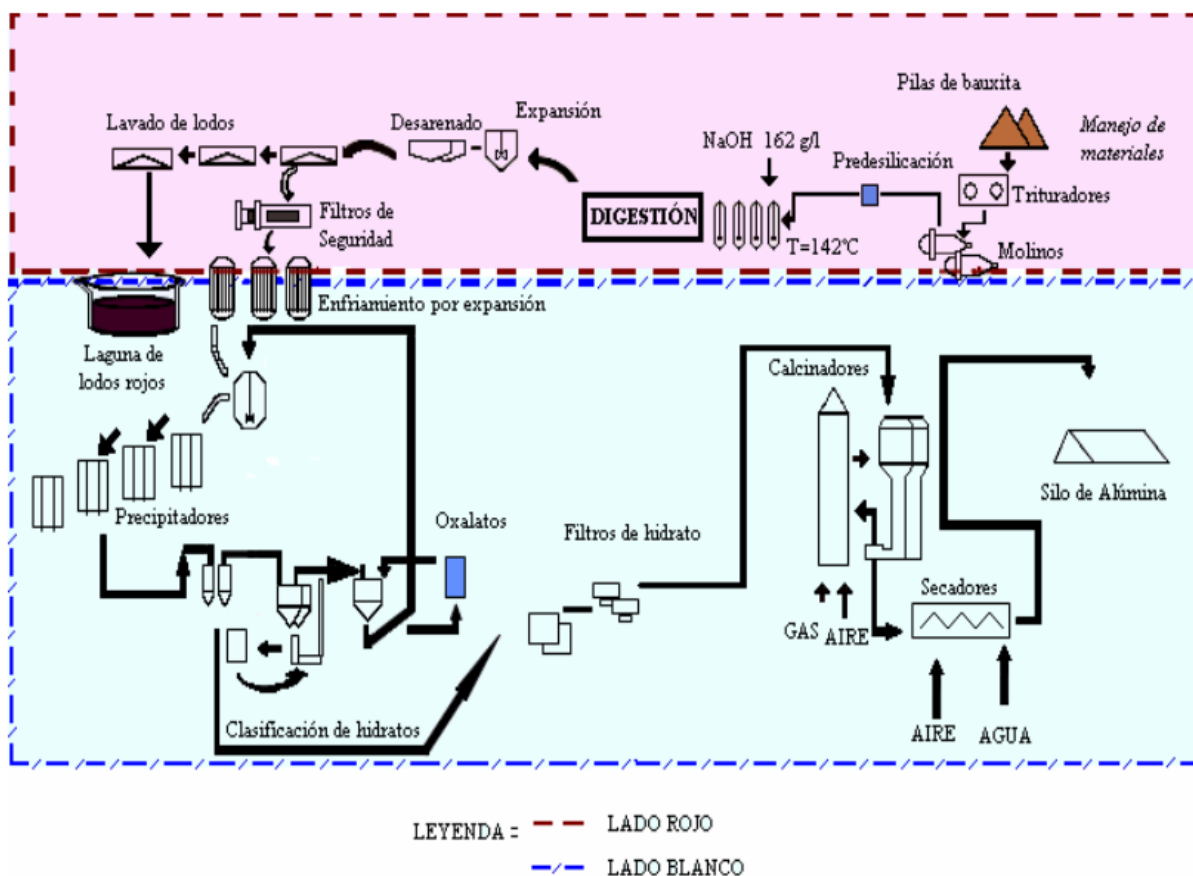


Figura 3. Esquema del proceso Bayer para la obtención de alúmina [18]

2.2.1 Área de manejo de materiales

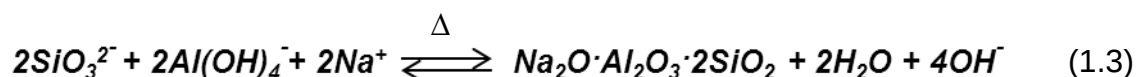
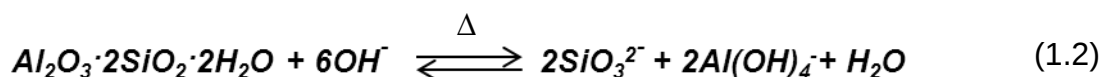
El área de manejo de materiales está conformada por los equipos que permiten el manejo de la bauxita e hidróxido de sodio y la transportación del producto final hacia las diferentes empresas para continuar con el proceso Hall-Hérault. El área de manejo de materiales también cuenta con unidades para el apilado y recuperación de la bauxita y con silos para el almacenamiento de la alúmina.

2.2.2 Sección: Lado rojo

El lado rojo se encarga básicamente de la reducción del tamaño de las partículas del mineral, la extracción de la alúmina contenida en la bauxita y la separación de las impurezas que acompañan a la alúmina; está constituido por las siguientes áreas: trituración y molienda, pre-desilicación, digestión, desarenado, separación y lavado de lodo rojo, caustificación de carbonatos, preparación de lechada de cal y filtración de seguridad.

El proceso comienza en el área de reducción de tamaño, donde se ajusta a un tamaño específico de partículas (80% menor a 0,3 mm). Aquí se prepara la materia prima, agregándose cal viva con el fin de reciclar el hidróxido de sodio al final del proceso, controlando las impurezas (carbonatos) presentes en ella. ^[7]

Seguidamente la suspensión de bauxita molida es conducida a la etapa de pre-desilicación, con el propósito de eliminar la sílice reactiva a fin de obtener un material final dentro de las especificaciones requeridas, antes del proceso de digestión. El proceso de pre-desilicación consiste en incrementar la temperatura del lodo o pulpa de bauxita a 100 °C, manteniéndola durante 8 horas, al tiempo que se agita el material para que ocurran las reacciones (1.2) y (1.3).



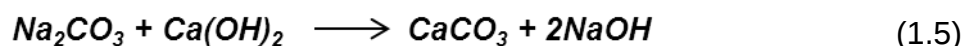
Posteriormente, en la sección de digestión de la planta, la mezcla proveniente del área de pre-desilicación es atacada por una disolución de hidróxido de sodio que disuelve algunos de los compuestos químicos presentes en ella, principalmente la alúmina, formando soluciones de aluminato sódico ($NaAlO_2$), mientras que otros compuestos permanecen en fase sólida. Las condiciones necesarias para que ocurra la reacción son 140 °C y 4 atmósferas de presión. La reacción general (1.4) es la que ocurre durante la digestión. [8]



El flujo producido, formado por aluminato de sodio y partículas sólidas, es bombeado a la fase de desarenación en donde los hidrociclones son usados para la separación de las partículas sólidas en la suspensión (slurry, en inglés) mayores a 0,1 mm las cuales son denominadas “arena”. La suspensión desarenada es alimentada a los tanques espesadores, llevándose a cabo la separación del lodo rojo por medio de un proceso de sedimentación. Adicionalmente, se añade floculante sintético (polímero) en varios puntos para acelerar la velocidad de asentamiento. El lodo rojo se envía a las lagunas de almacenamiento como materia de desecho. La solución libre de contaminantes (solución madre) rebosa en la parte superior del tanque para ser enviado al área de filtración de seguridad.

La etapa de lechada de cal tiene la función de apagar la cal viva (CaO) y producir una lechada de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) que se utiliza en la separación y lavado de lodos, en la caustificación de carbonatos y filtración de seguridad.

En el área de caustificación de carbonatos se controlan los niveles de contaminación de la solución del proceso a través del carbonato de sodio (Na_2CO_3), convirtiéndolo en carbonato de calcio (CaCO_3), que se elimina del proceso. La caustificación de carbonatos se obtiene a través de la adición controlada de lechada de cal, mediante la reacción (1.5):



La solución clarificada (solución madre) se procesa en filtros de presión que suministran una mayor área de filtración y retienen los sólidos y cualquier partícula extraña que no haya podido depositarse en los tanques espesadores de la etapa de clarificación, constituyendo así un factor de contaminación del producto. Para que estos filtros cumplan con su ciclo normal de operación se utiliza un coadyudante para la filtración (aluminato tricálcico, TAC) cuya función es evitar el taponamiento, en un tiempo muy corto, de los poros del medio filtrante. La reacción de formación del TAC es:



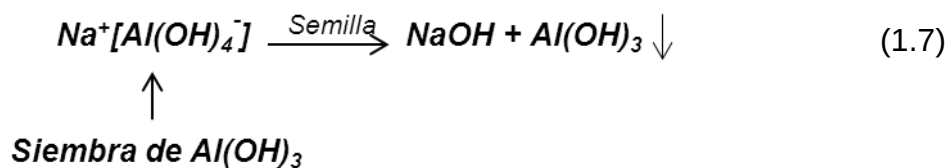
Posteriormente la solución pasa al lado blanco en donde se manejan las suspensiones ricas en aluminato y se obtiene la alúmina.

2.2.3 Sección: Lado blanco

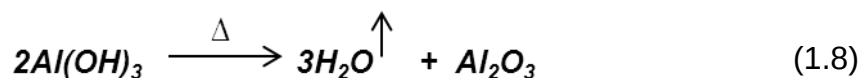
Este lado básicamente se encarga de la disminución de la temperatura y la concentración de hidróxido de sodio para así precipitar el hidrato de alúmina que luego es calcinado para obtenerla en alto grado metalúrgico. El lado blanco está compuesto por las siguientes áreas: enfriamiento por expansión, precipitación, clasificación de hidrato, filtración de producto y calcinación.

En este lado llega la suspensión de aluminato de sodio después de haberse filtrado, la cual pasa a una fase de enfriamiento por expansión que opera la reducción de la temperatura de la solución madre al valor requerido para el proceso de precipitación de alúmina.

La precipitación del hidrato es promovida por la adición de semillas de trihidrato de aluminio, las cuales van a actuar como nucleadores y fomentadores del crecimiento de las partículas de hidróxido de aluminio. Lo que sale de éste último proceso, es decir, parte de la solución que no precipitó, se recicla hasta agotar el hidróxido de sodio y finalmente se envía hacia las lagunas de contención donde finaliza el lodo rojo. ^[9]



En las áreas de filtración y calcinación se convierte el hidróxido de aluminio en alúmina grado metalúrgico, con máxima reducción de sodio soluble asociado al hidrato. La reacción de calcinación es la siguiente:



La calidad de alúmina depende de la etapa de calcinación, la cual está condicionada esencialmente por un rango de temperatura de 1100 a 1200 °C para obtener un producto de calidad industrial, ya que se debe contener una proporción baja de partículas finas (menores del 10% > 45µm). ^{[10], [11]}

2.2.4 Importancia del área de digestión

El área de digestión tiene como objetivo disolver la mayor cantidad posible de alúmina trihidratada ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) contenida en la bauxita utilizando hidróxido de sodio (NaOH). La digestión en el proceso Bayer es la etapa más importante en la producción de alúmina y juega un papel fundamental en la eficacia del ciclo, productividad y consumo de energía del sistema de producción, por lo tanto, el diseño de este sistema tiene que satisfacer todos los requisitos tecnológicos para la digestión de la bauxita. En la Figura 4 se puede observar el diagrama de la etapa de digestión, así como la disposición de los equipos para el aprovechamiento energético:

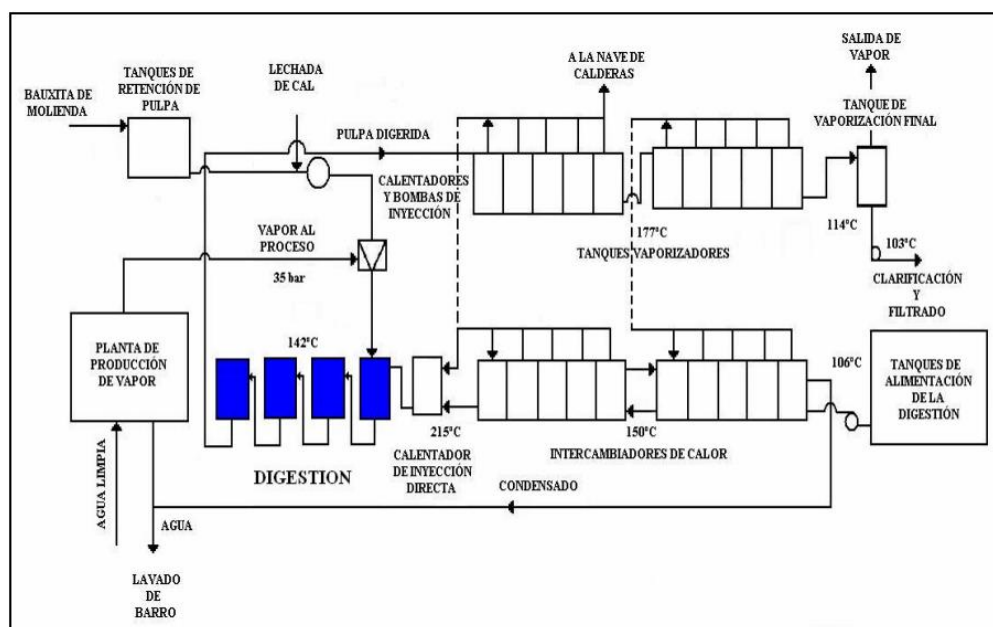
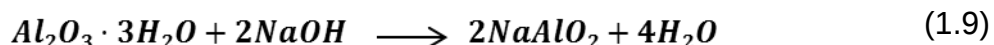


Figura 4. Digestión de la bauxita y operaciones de intercambio de calor [12]

El proceso de digestión debe garantizar una adecuada disolución de la alúmina, pero también debe promover una completa desilicación de la solución, es decir, precipitación de la sílice, el cual es un parámetro de vital importancia para el control de calidad del material proveniente de la bauxita. [13]

Las reacciones de digestión que suceden a alta presión y temperatura son:



Las reacciones (1.9) y (2.0) dan como resultado el aluminato sódico a partir de la gibbsita y la bohemita respectivamente. Estas reacciones de disolución son endotérmicas, por lo que se requiere calor para mantener la temperatura de reacción. El aluminato sódico es favorecido por el incremento de temperatura y concentración de hidróxido de sodio, el equilibrio se alcanza cuando ya no es posible disolver más hidrato de alúmina (hidróxido de aluminio) y la solubilidad de ellos es función de la temperatura y de las concentraciones de hidróxido de sodio y alúmina.^[13]

La reducción del contenido de sílice en el proceso Bayer es una de las mayores preocupaciones de las plantas operadoras de alúmina. Los minerales silíceos presentes en las bauxitas tropicales causan problemas en la calidad de la alúmina obtenida en el proceso, ya que consumen la solución de la misma y de hidróxido en los intercambiadores de calor.^[14]

2.3 Desechos del proceso Bayer para la obtención de alúmina

2.3.1 Lodo rojo

El lodo rojo es un fango rojo herrumbre brillante, altamente alcalino, con un pH~12 y alta concentración de sodio que resulta del procesamiento de la bauxita por el método Bayer. Según el Decreto 2635 de la Legislación Venezolana es considerado un desecho peligroso, tóxico y corrosivo.^[21]

Es una suspensión sólido/líquido con 20-30% de sólido en solución acuosa cáustica. Los sólidos están constituidos por una fracción gruesa formada, principalmente, por arena sílice y una fracción fina con alto contenido de hierro. En la Tabla 2 se muestra la composición del lodo rojo. ^[15]

Tabla 2. Composición del lodo rojo generados por Interálumina ^[15]

Componente	Concentración (%)
Soda Cáustica	14,8
Alúmina	13,9
Titanio	3,9
Hierro	44,7
Silicio	21,3
pH	12,2

2.3.2 Licor cáustico

El licor cáustico se encuentra conformado principalmente por hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio (Na_2CO_3), bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y carbonato de calcio (CaCO_3). Es un líquido amarillo claro de pH~13. Considerado como un desecho peligroso, tóxico, corrosivo y principal factor de formación de lixiviados. ^[6]

2.3.3 Hidróxido de sodio

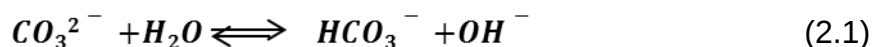
El hidróxido de sodio es un compuesto químico clasificado como una base, de fórmula molecular NaOH. Es una sustancia manufacturada. Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor. Es muy corrosivo y puede causar quemaduras graves en todo el tejido con el cual entra en contacto. ^[16]

2.3.4 Carbonato de sodio (Na_2CO_3)

El carbonato de sodio, conocido como soda Solvay o soda Ash, es una sal de color blanco, de fórmula química Na_2CO_3 . Puede presentarse, según las condiciones de temperatura y humedad, en forma anhidra (sin agua) o como hidratos, con hábitos cristalinos ortorrómbicos, conteniendo proporciones definidas de agua. Forma cinco (5) hidratos diferentes: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, siendo los más estables las formas monohidratadas, heptahidratadas y decahidratadas.

El Na_2CO_3 cuando cristaliza a temperaturas menores de 32°C , lo hace en la forma decahidratada, caracterizada por cristales grandes y transparentes. Estos cristales expuestos al aire eflorescen y se disgregan gradualmente para dar un sólido blanco, probablemente el monohidratado. Si el Na_2CO_3 cristaliza entre 32°C y 35°C , lo hace bajo la forma de heptahidrato, mientras que si se evapora a altas temperaturas, lo que cristaliza es el monohidrato. ^[17]

Dado que es el anión de un ácido débil (HCO_3^-), el ión carbonato se comporta como una base fuerte:



2.4 Impacto del licor cáustico sobre el ambiente

En el proceso Bayer para la obtención de alúmina, la bauxita es lavada, pulverizada y disuelta en sosa cáustica (hidróxido de sodio), haciendo la solución altamente corrosiva. El licor resultante de la dilución de la bauxita contiene altos porcentajes de aluminato de sodio y residuos no disueltos de hierro, silicio y titanio; otros elementos como el zinc, fósforo, níquel o cromo se encuentran como trazas. Dichos residuos sólidos son los

llamados lodos rojos, los cuales sedimentan, son eliminados y entran dentro de la definición del Decreto 2635 “Normas para el control y la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos”, cuyo Capítulo I, artículo 3, define: “Desecho: Material, sustancia, solución, mezcla u objeto para los cuales no se prevé un destino inmediato y deba ser eliminado o dispuesto en forma permanente”. [18]

El lodo rojo y el licor cáustico son estables químicamente, sin embargo, uno de los aspectos más importantes desde el punto de vista del impacto ambiental lo conforma el alto contenido de sodio. Sus diversas formas poseen una alta capacidad de intercambio iónico, lo cual hace que el sodio sea liberado a la solución intersticial del lodo rojo, pudiendo migrar, liberándose sodio de manera continua durante largos períodos. En general, las consecuencias ambientales son:

1. Dsecación del lodo rojo: el sodio es un ion pequeño que atrae moléculas de agua mediante fuerzas iónicas. El sodio también suele adsorberse en las superficies, dificultando la dsecación física y también aumenta la conductividad eléctrica del agua e inhibe la posibilidad de electrodesecación del lodo rojo.
2. Escorrentía superficial: la liberación lenta y sostenida de sodio se traduce en que la escorrentía superficial puede ser extremadamente alcalina (normalmente pH~12) durante varios años después de su vertido.
3. Contaminación de aguas subterráneas: la percolación lenta del agua genera una disolución alcalina que puede contaminar las aguas subterráneas.
4. Recuperación tras la clausura: la alta alcalinidad impide la penetración de las raíces durante la revegetación y por lo tanto hace necesaria la creación de una cubierta del suelo para permitir el crecimiento de las plantas.
5. Utilización del lodo rojo: obstaculiza la reutilización del material, por ejemplo para recuperar los metales valiosos contenidos en el. [6]

En el Estado Bolívar las lagunas de contención de licor cáustico y lodo rojo se encuentran en las cercanías del río Orinoco, como se muestra en la Figura 5 y 6, por el beneficio del puerto que permite sacar los productos, además de la potencia eléctrica generada en la zona, que es uno de los factores de mayor importancia y desde el punto de vista de la ingeniería, por la concavidad existente en el terreno. ^[19]

Estas lagunas están sometidas a un proceso de evaporación natural, sin embargo en nuestro país supera la precipitación anual y eso hace que la cantidad de líquido sea negativo en el balance final, por lo que podrían ocurrir desbordamientos de las lagunas de licor cáustico hacia el río Orinoco, alterando la calidad de las aguas y como consecuencia aunada conllevar a la destrucción de la fauna acuática y de la vegetación; además de afectar el abastecimiento de agua a las industrias para su producción y refrigeración; a los sistemas de riego en terrenos cultivados y provocar desmejoras en la calidad de vida de los habitantes de zonas circundantes para su consumo y/o aseo personal, comprometiendo principalmente su salud.



Figura 5. Proximidad de las lagunas de licor cáustico al río Orinoco

Entre las poblaciones más expuestas se encuentra la comunidad indígena de pescadores de Cambalache en el Municipio Caroní del Estado Bolívar, quienes han

denunciado que los derechos ambientales no se cumplen y su salud está siendo afectada por los vertederos de desechos tóxicos. [20]

La contaminación del Río Orinoco con licor cáustico constituye una violación del decreto 883 “Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos”, donde se define en el Capítulo I, artículo 2 “Contaminación de las aguas: Acción o efecto de introducir elementos, compuestos o formas de energía capaces de modificar las condiciones del cuerpo de agua superficial, o subterráneo de manera que se altere su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica para el desarrollo de la vida acuática y ribereña”. [21]



Figura 6. Lagunas artificiales de licor cáustico y lodo rojo [22]

2.5 Evaporación natural

La evaporación es el paso del estado líquido al estado gaseoso cuando las moléculas superficiales en el estado líquido se separan debido al calor latente, suministrado por la energía interna molecular del cuerpo, en cuyo caso se produce la disminución de su temperatura; o debido a la energía radiante, donde aumenta la temperatura del cuerpo y se incrementa la energía cinética de las moléculas en el estado líquido haciendo que

una parte de éstas se escapan al medio ambiente tan rápido como menor sea la presión atmosférica. [23]

La cantidad o facilidad de evaporación depende:

- De una gran superficie de contacto con el aire, pues las moléculas del líquido tienen un movimiento rectilíneo en todas las direcciones, alcanzando algunas de ellas la superficie y pasando a la atmosfera en cantidad mayor o menor, según sea mayor o menor la superficie líquida.
- De la temperatura, ya que aumenta la energía cinética, que se traduce en un aumento de velocidad de las moléculas, siendo por tanto, mayor el número que pasa a la atmosfera (por hacerse menor la tensión superficial).
- De la renovación o cambio de las capas de aire, ya que habrá más aire con capacidad para recibir y retener moléculas de líquido evaporado evitando el equilibrio o saturación del mismo.
- Humedad atmosférica: es necesario que el aire próximo a la superficie de evaporación no esté saturado (menos humedad más evaporación).
- Presión atmosférica: a menor presión (y/o mayor altitud) más evaporación.

Otros factores determinantes para la evaporación en superficies libres es el tamaño de la masa de agua y su profundidad por el efecto del calentamiento de la misma. Si es poco profunda la masa del líquido se calentará uniformemente por acción de la radiación solar y la evaporación se verá favorecida. [24]

2.6 Evaporación acelerada

La evaporación acelerada es un sistema que incrementa el intercambio de moléculas de un líquido con el aire, buscando maximizar las variables que entran en juego en el

proceso de evaporación, como son: temperatura, humedad relativa del aire, velocidad del viento (energía cinética) y superficie de contacto líquido/aire.

Ventajas de la evaporación acelerada:

- Alternativa económica, bajo consumo energético.
- Proceso simple, natural, estable y fiable.
- Cero emisiones líquidas al cuerpo receptor.
- No se generan lodos activados.
- Reducción de espacios.
- Mantención reducida por personal no calificado.
- Consumo eléctrico constante. ^[42]

2.6.1 Sistemas de evaporación acelerada

Se han desarrollado sistemas para obtener una evaporación acelerada que se basa en la utilización de un soporte de líquido formado por un panel alveolar de gran superficie por unidad de volumen ocupado, como se representa en la Figura 7. El líquido es proyectado sobre el panel con un sistema de riego, produciéndose ciclos repetitivos de evaporación/concentración. Por otra parte, y con el fin de aprovechar mejor las variables atmosféricas, el panel se desarrolla en altura, para beneficiarse de una velocidad mayor del viento. ^[42]

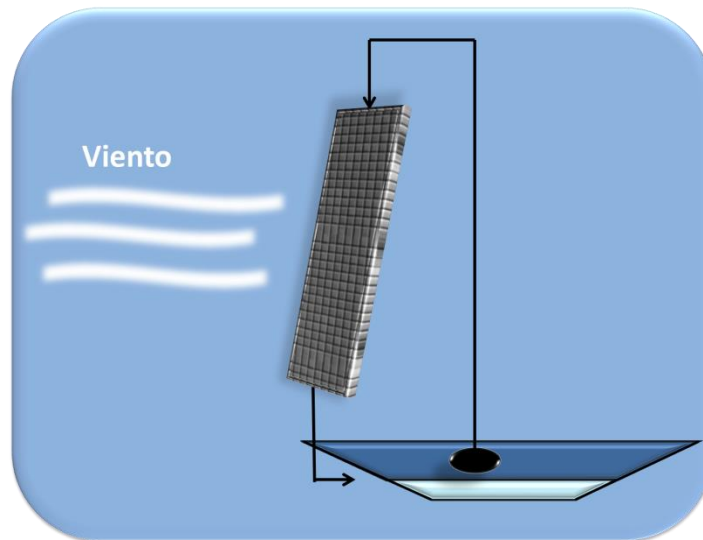


Figura 7. Proceso de aceleración de intercambio aire-agua

2.6.2 Descripción del sistema

El soporte físico de la interface líquido/aire utilizada en los sistemas de evaporación acelerada es un panel alveolar construido a base de rejillas que ocupan una gran área superficial. Este panel tiene las siguientes propiedades:

- Gran capacidad de retención de líquidos en la trama de la rejilla, que permite un proceso continuo de evaporación.
- Forma alveolar de construcción del panel con un buen perfil aerodinámico (con baja pérdida de carga), que permite un aprovechamiento máximo de la masa y de la energía cinética del aire.
- Rejilla del panel construida de un material resistente a la mayoría de los agentes químicos que pueden estar presentes en los líquidos a evaporar.

El aspersor utilizado para el regado del panel en los sistemas de evaporación acelerada tienen las siguientes propiedades:

- Baja presión de alimentación con una gran apertura del regado en cono lleno.
- Difícilmente obturable.
- Construido de un material que presente resistencia química análoga a la del material del panel. [25]

Los aspersores transforman la energía total de un líquido en energía cinética. Esta última es utilizada para descomponer el líquido en pequeñas partículas y distribuir las uniformemente de acuerdo con las condiciones deseadas. En ciertos casos, la energía cinética es utilizada para conferir al líquido una mayor penetración. En otros casos, la boquilla permite obtener un caudal variable en función de la presión. En los aspersores de cono lleno, la parte interna del cono está uniformemente construida por partículas líquidas. El área cubierta por la boquilla, es perpendicular al chorro, y en este caso, es un círculo cuyo diámetro está en función de la distancia y del ángulo de aspersión. [26]

En la Figura 8 se muestra un sistema de evaporación acelerada.



Figura 8. Sistema de evaporación acelerada

Los estanques de almacenamiento deben cumplir con el decreto 2635 de la legislación venezolana cuyo artículo 18, cita: “Los tanques para almacenamientos de materiales peligrosos recuperables deben ser impermeables y resistentes al material almacenado, colocados en fosas con capacidad suficiente para una contingencia de derrame. El tanque estará identificado con su capacidad, contenido y símbolo de peligro”. [18]

Un revestimiento seguro consta de: una malla geotextil, un revestimiento sintético y una barrera de arcilla compactada con una geomembrana, como se muestra en la Figura 9.

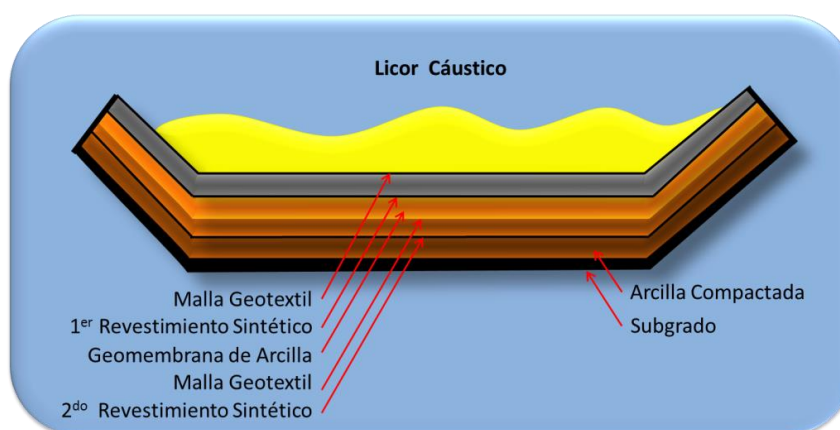


Figura 9. Revestimiento para un vertedero de desechos tóxicos seguro

Otro método empleado es cubrir el fondo de la laguna con el mismo lodo rojo, ya que estos poseen una consistencia limosa, con partículas pequeñas que sellan el fondo.

2.7 Evaporación forzada

Los métodos de evaporación forzada consisten en sistemas empleados para zonas que presentan temperaturas bajas, de poco viento o alta precipitación. El sistema dispone de un ventilador cuya finalidad es acelerar la renovación del aire próximo a la superficie de evaporación que está saturado, como se representa en la Figura 10.

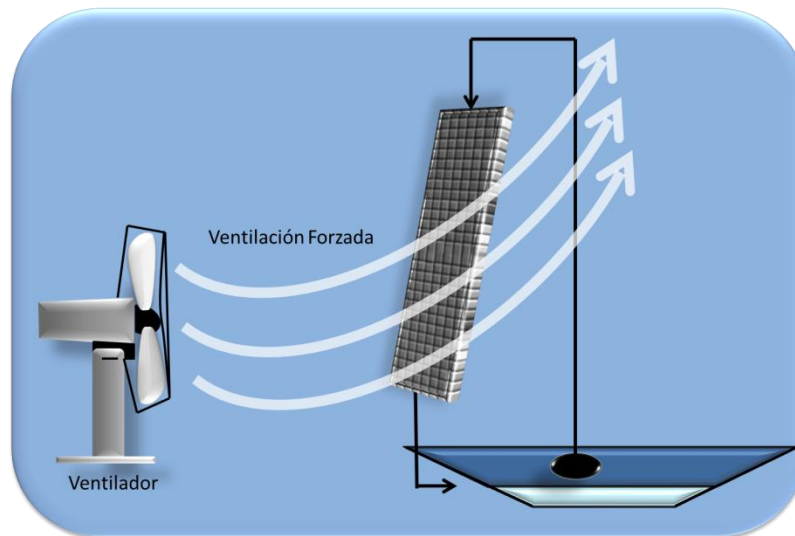


Figura 10. Sistema de evaporación forzada.

El sistema de ventilación es una turbomáquina que transmite energía para generar la presión necesaria a través del giro de sus aspas, con la finalidad de mantener un flujo continuo de aire. [27]

2.8 Factores meteorológicos y climatológicos que influyen en la evaporación

La meteorología como ciencia que estudia la atmosfera, trata de establecer la interrelación que existe entre los parámetros del ciclo hidrológico: viento, precipitación, temperatura, presión y humedad. También involucra consideraciones geográficas, debido a los factores como latitud, longitud, topografía y la ubicación de las masas de agua y tierra que afectan el carácter y distribución de las condiciones meteorológicas sobre la superficie terrestre. Todos estos factores determinan la magnitud de la precipitación y la respuesta de la cuenca, así como la distribución en el espacio y en el tiempo.

2.8.1 Radiación solar

La radiación solar es la fuente de energía que ocasiona la ocurrencia del ciclo hidrológico, responsable del movimiento atmosférico terrestre y principal fuente de energía del planeta.

Como fenómeno físico, la evaporación es la conversión del agua en vapor, proceso continuo durante las horas de luz solar y frecuentemente durante la noche. Debido a que el cambio de estado de las moléculas de líquido a gas requiere cierta cantidad de energía (calor latente de vaporización) el proceso es más activo bajo la radiación directa del sol. Por lo tanto, la nubosidad reduce la evaporación al no permitir que el espectro total de energía solar llegue a la superficie terrestre.

2.8.2 Humedad

- **Características del vapor de agua**

La fracción de la atmósfera conformada por el vapor de agua determina las condiciones meteorológicas prevalecientes. La precipitación se deriva de esta agua atmosférica. El contenido de humedad en el aire es también un factor significativo en el proceso de evaporación local.

Al considerar un volumen de control sobre una superficie de agua, la humedad contenida en el aire, bajo la forma de vapor, ejerce una presión parcial, denominada justamente presión de vapor. Si la condición inicial del volumen de control es de aire seco, se produce evaporación, incrementándose la cantidad de humedad en el aire, y por lo tanto, también la presión de vapor, mientras continúe el proceso o el aire se sature de agua perdiendo su capacidad de absorción. La evaporación continuará hasta

que la presión del vapor de aire circundante se nivele con la presión sobre la superficie de agua. En este instante cesa el proceso de evaporación, y si las temperaturas del aire y del agua son iguales, se dice que el aire está saturado.

La humedad como expresión del contenido de agua en el aire determina la capacidad de éste para absorber el vapor formado mediante el proceso de evaporación. A medida que la humedad se incrementa, decrece la tasa de evaporación. Luego, el aire húmedo removido por el viento tiene que ser reemplazado por aire más seco para que el proceso de evaporación no se paralice. [28]

- **Gráfica del contenido de humedad en el aire**

Existen gráficas que permiten leer directamente el contenido de agua del aire saturado a una temperatura dada. Tales diagramas expresan el contenido sobre la base de una cantidad de aire. Las unidades empleadas son: “gramos de agua por gramos de aire seco” y “moles de agua por mol de aire seco”. Igualmente se emplean para conocer no sólo el contenido acuoso del aire saturado, sino también el contenido del aire parcialmente saturado. En la gráfica las curvas representan diversos contenidos de humedad, y el contenido a cierto porcentaje dado se da como un producto directo del porcentaje y del contenido del aire totalmente saturado, a la temperatura que se trata.

Cuando el aire parcialmente saturado se pone en contacto con el agua, como sucede por ejemplo, al pasarlo a través de rocío o sobre una superficie humedecida, incrementa su contenido de humedad. La evaporación del agua requiere calor, que lo proporciona el aire. Cuando todo el calor de vaporización es proporcionado por enfriamiento del aire el proceso es adiabático (no hay entrada ni salida de calor). Las curvas denominadas de saturación adiabáticas muestran el camino humedad-temperatura que el aire toma

cuando se pone en contacto con el agua, de la manera que se señaló con anterioridad.^[29]

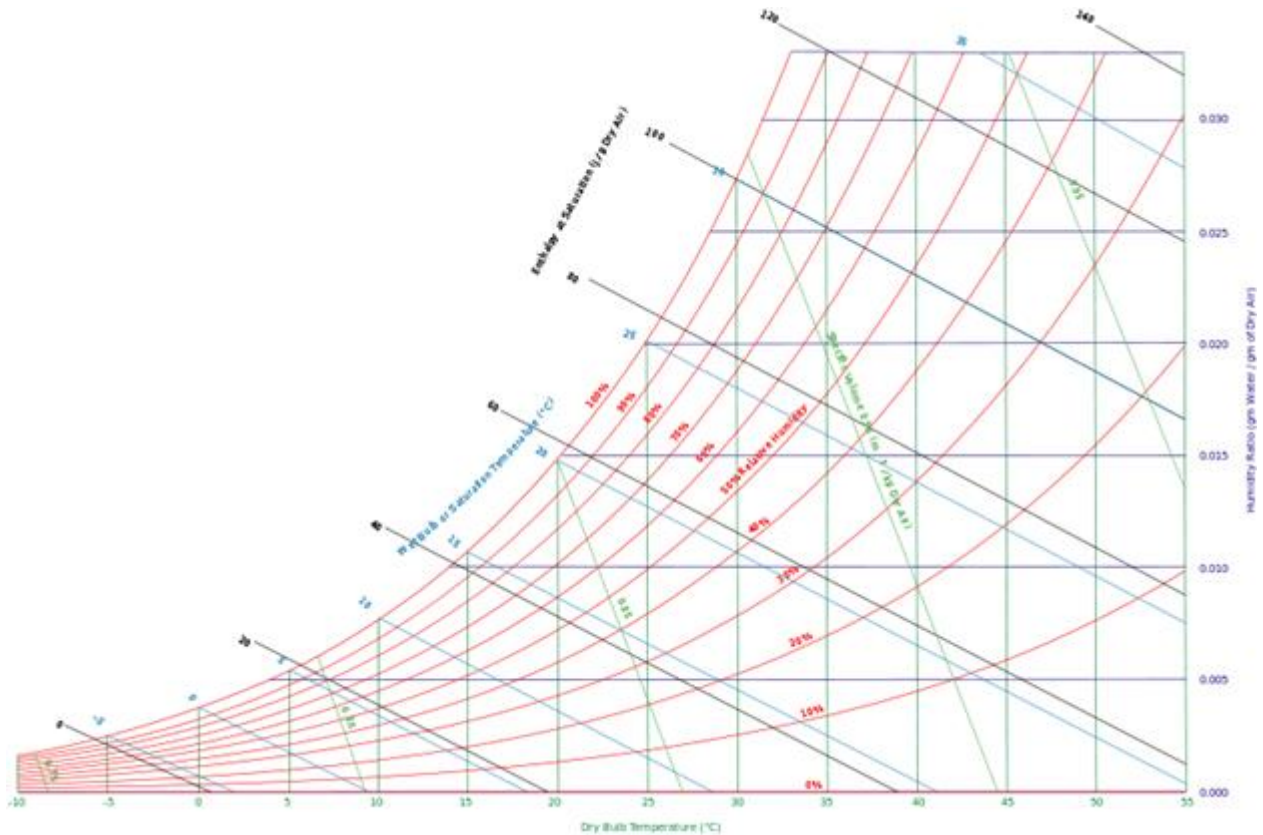


Figura 11. Gráfica del contenido de humedad en el aire a 1 atm de presión ^[29]

2.8.3 Viento

El viento se origina por las diferencias de presión y temperatura y se manifiestan como movimiento de las masas de aire. Las características fundamentales del viento son: dirección, velocidad o intensidad y perfil de distribución de velocidades.

La velocidad del viento se expresa en (m/s), (Km/h) o (nudos), y se mide mediante el anemómetro a 2 m de altura, valor que se utiliza en los estudios de evaporación.

A medida que el agua se evapora hacia la atmósfera, la capa entre el suelo y el aire tiende a saturarse provocando una disminución del proceso de evaporación, a menos que el vapor sea removido y continuamente reemplazado por aire seco. El movimiento de aire depende de la velocidad del viento. ^[28]

2.8.4 Temperatura

La temperatura del medio ambiente es una consecuencia directa de la insolación y de la radiación. Su determinación es fundamental para el cálculo de la evaporación, ya que para llevarse a cabo este fenómeno físico se requiere del suministro de energía en forma de calor que aumenta la energía cinética de las moléculas del líquido venciendo la tensión superficial, esto es, su energía cinética debe exceder el trabajo de cohesión aplicado por la tensión superficial a la superficie del líquido, es por eso que la evaporación se lleva a cabo más rápido a altas temperaturas. ^[28]

2.9 Datos climatológicos de Puertos Ordaz, Estado Bolívar, Venezuela

En el Estado Bolívar la temperatura media anual (Max-Min) varía entre 27 - 30 °C (zona de Puerto Ordaz). Entre 27 - 31 °C (zona de Ciudad Bolívar). Entre 18 - 23 °C (zona de la Gran Sabana). ^[30]

En la Tabla 3 se presenta el promedio de los datos climatológicos de los últimos 5 años de Puerto Ordaz, Estado Bolívar. ^[31]

Tabla 3. Datos meteorológicos de Puerto Ordaz, Edo. Bolívar – Venezuela ^[31]

Datos Meteorológicos.	Promedios Meteorológicos				
Año	2007	2008	2009	2010	2011
Temperatura máxima (°C)	35,6	35,4	35,9	34,8	35,9
Temperatura mínima (°C)	2,4	22,4	22,1	31,4	22,1
Temperatura media (°C)	28,9	29,1	29,3	28,6	29,3
Precipitación total (mm)	37,2	22,3	36,6	52,6	38,3
Media de velocidad del viento (Km/h)	16,8	13,3	11,1	12,8	11,1
Radiación promedio anual (W/m ²)	12,5	18,7	16,3	---	---

2.10 Métodos para estimar la evaporación

2.10.1 Evaporación desde superficies libres (lagos o lagunas)

La evaporación desde superficies libres se efectúa por medio de un tanque de evaporación denominado Tanque Evaporimétrico, sin embargo, se han desarrollado numerosas fórmulas empíricas y semiempíricas que permiten llegar a resultados lo más aproximado posible.

Dalton propuso en el año 1802 una ecuación empírica para la determinación de la evaporación que se basa en un método aerodinámico, es decir, que contemple parámetros climatológicos de viento y calor, como se presenta a continuación:

$$E_a = C(e_s - e)f(u) \quad (\text{mm/día}) \quad (\text{Ec. 1.0})$$

Donde:

E_a = evaporación del lago en (mm/día) para una temperatura de aire y agua de T (°C),

C = una constante empírica,

e_s = presión del vapor de saturación del aire a T(°C) en (mmHg),

e = presión actual del vapor en el aire en (mmHg),

u = velocidad del viento a una altura estándar en (m/s).

$$C = \frac{0,102u_2}{\left[\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right)\right]^2} \text{ (mm/día)/Pa} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde:

Z_2 = altura a la que se determina la velocidad del viento,

Z_1 = altura de la superficie del líquido.

$$e_s = 611 \exp \frac{17,27T}{237,3 + T} \text{ (Pa)} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

$$e = R_h e_s \text{ (Pa)} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde:

R_h = humedad relativa ($0 \leq R_h \leq 1$).

$$f(u) = 0,27 \cdot \left(1 + U_2 \cdot \frac{86,4}{100}\right) \quad (\text{Ec. 1.4})$$

$$U_2 = 4,87 \cdot \left(\frac{U_z \cdot \frac{1000}{3600 \cdot 24}}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)}\right) \text{ (m/s)} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Donde:

U_z = velocidad del viento a z metros del suelo ^[28].

En el año 1948 Penman plantea una ecuación empírica para determinar las tasas de evaporación contemplando viento y radiación.

$$Et_o = k \cdot [R_n + (1 - W)f(u) \cdot (e^\circ - e)] \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Donde:

R_n = radiación neta (mm/día).

$$Rn(mm/día) = Rn(W/m^2) \cdot 0,0353 \quad (\text{Ec. 1.7})$$

k = coeficiente de conversión de energía por unidad de superficie en mm de agua que es capaz de evaporar esa energía.

$$k = \frac{10}{\lambda_v} \quad (\text{cal} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{x k} \rightarrow \text{mm}) \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Se obtiene considerando el calor de vaporización del agua.

$$1 \cdot (\text{cal} \cdot \text{cm}^2) \cdot \left(\frac{1g}{\lambda_v \cdot \text{cal}} \right) \cdot \left(\frac{1Kg}{10^3g} \right) \cdot \left(\frac{1L}{Kg} \right) \cdot \left(\frac{10^4 \text{ cm}^2}{1m^2} \right) \quad (\text{Ec. 1.9})$$

λ_v = calor de vaporización del agua (cal/g).

$$\lambda_v = 595 - tm \cdot 0,51 \quad (\text{Ec. 2.0})$$

tm = temperatura media en °C.

W = Factor de ponderación de los efectos de la radiación sobre Et_o .

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \Upsilon} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Δ = pendiente de la curva de saturación del vapor, que se estima con la derivada de la fórmula de Bosen particularizada por la temperatura media tm (°C).

$$\Delta = 33,8693 \cdot [0,05904 \cdot (0,0078 \cdot tm + 0,8072)^7 - 0,0000342] (\text{mb/°C}) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Υ = constante psicrométrica, calculada por la expresión:

$$\Upsilon = \frac{[Cp \cdot P_i]}{[0,62198 \cdot \lambda_{vi}]} \quad (\text{mb/°C}) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Cp = calor específico del aire seco a presión constante.

$$Cp = 0,240 \quad (\text{kcal} \cdot (\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

P = presión atmosférica en mb.

$(1-W)$ = factor de ponderación correspondiente a los efectos del viento y de la humedad.

$$(1 - W) = \frac{\Upsilon}{\Delta + \Upsilon} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$f(u)$ = función del viento, que define los efectos del viento como energía disponible para evaporar agua, se calcula por medio de la siguiente expresión: [32]

$$f(u) = 15,36(1 + 0,0062 \cdot U_2) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

U_2 = velocidad del viento (Km/día) a una altura z en (m).

$$U_2 = U_z \cdot \left(\frac{2}{z}\right)^{0.2} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$(e^\circ - e)$ = déficit de saturación de vapor. (Se calcula según la Ec. 1.2 y 1.3)

2.11 Pérdidas por evaporación y arrastre del viento

El riego por aspersión contempla la evaporación de las gotas de agua que producen los aspersores y el arrastre de dichas gotas por efecto del viento, en las cuales tiene gran importancia el tamaño de las gotas de agua que dan los aspersores y serán mayores cuanto más pequeña sean las gotas y mayor sea el viento y la temperatura. ^[33]

Las pérdidas por evaporación y arrastre del viento (**P_e**) se calculan como la diferencia entre la lámina de agua aplicada por los aspersores (**L_a**) y la lámina de agua recogida (**L_p**):

$$P_e = 100 \cdot \left(\frac{L_a - L_p}{L_a}\right) \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Para calcular la lámina de agua aplicada por los aspersores (**L_a**) se mide el caudal de cada aspersor que moja la zona evaluada. Las medidas se realizan siguiendo los pasos a continuación:

- El caudal de cada aspersor, en litro por hora, se calcula mediante la fórmula:

$$Q_a(L/h) = \frac{\text{Volumen recogido (L)} \cdot 3600}{\text{Tiempo de llenado (s)}} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

- Se toma en cuenta la cantidad de líquido que cae en la zona evaluada.
- L_a se determina de la siguiente manera:

$$L_a(\text{mm}) = \frac{Q_a (\text{L/h})}{\text{Superficie zona evaluada (m}^2\text{)}} \cdot \text{Tiempo evaluado (min)} \quad (\text{Ec. 3.0})$$

La lámina de agua recogida (L_p) se calcula siguiendo los pasos a continuación.

- Se calcula el área involucrada (cm^2).
- La lámina de agua recogida es:

$$L_p(\text{mm}) = \frac{\text{Volumen mendio recogido (cm}^3\text{)}}{\text{Área involucrada (cm}^2\text{)}} \cdot 10 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

2.12 Transferencia de calor

La transferencia de calor es la energía de transmisión debido a una diferencia de temperatura y se encuentra clasificado en procesos o modos. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario – que puede ser un sólido o un líquido – se emplea el término conducción para referirse a la transferencia de calor que se producirá a través del medio. En cambio, el término convección se refiere a la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. El tercer modo de transferencia de calor se denomina radiación térmica. Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnética, por tanto, en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas.

2.12.1 Conducción

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas. Las temperaturas más altas se asocian con las energías moleculares más altas y, cuando las moléculas vecinas chocan, como lo hacen constantemente, debe ocurrir una transferencia de moléculas más energéticas a las menos energéticas. En presencia de un gradiente de temperatura, la transferencia de energía por conducción debe ocurrir entonces en la dirección de la temperatura decreciente.

Para cuantificar los procesos de transferencia de calor se emplean ecuaciones o modelos que sirven para determinar la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo, conocida como la Ley de Fourier:

$$q_x^n = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

El flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área q_x^n (W/m²) es la velocidad con la que se transfiere el calor en la dirección de x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx en esta dirección. La constante de proporcionalidad, k , es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica (W/m·K) y es una característica del material de la pared. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente.

2.12.2 Convección

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio

(difusión), la energía también se transfiere mediante el movimiento global, o macroscópico del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y el movimiento global del fluido.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación se conoce como la Ley de Enfriamiento de Newton y es de la forma:

$$q^n = h(T_s - T_\infty) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

q^n = flujo de calor por convección (W/m^2), es proporcional a la diferencia entre la temperatura de la superficie y del fluido, T_s y T_∞ , respectivamente.

h = coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$). Éste depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte. [34]

2.12.3 Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de onda electromagnética (o fotones) como resultado en los cambios en las configuraciones electrónicas de los

átomos o moléculas. No requiere de la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida y no sufre atenuación en el vacío.

La radiación térmica es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en K o R) es expresada por la Ley de Stefan-Boltzmann como:

$$\dot{Q}_{emitida, \max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4, \text{ o bien, } 0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{R}^4.$$

Denominado la constante de Stefan-Boltzmann. [35]

2.13 Percarbonato de sodio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$)

El percarbonato de sodio también es llamado peróxido de hidrógeno sólido. Es un tipo de compuesto de carbonato de sodio y peróxido de hidrógeno de fórmula molecular $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$, y se descompone para generar oxígeno, agua y carbonato de sodio, siendo todos compuestos naturales que por lo tanto no contaminan el medio ambiente. Su contenido de oxígeno activo iguala al del peróxido de hidrógeno en un 27.5%.

El percarbonato de sodio no sólo tiene la función del peróxido de hidrógeno líquido, sino que también puede descomponerse rápidamente a bajas temperaturas y generar grandes cantidades de oxígeno que se puede emplear para limpiar, blanquear, lavar y desinfectar. Además se emplea en los bactericidas, en tanques de agua de desecho y en desinfecciones médicas. [36]

3. ANTECEDENTES

La revisión bibliográfica reporta investigaciones para la remediación ambiental a través del reúso del lodo, biorremediación de suelos, recuperación de metales, efectos sobre la salud, diagnóstico y caracterización de las lagunas de sedimentación y evaluación de los efectos causados por este desecho ambiental.

Paradis (1993) ^[37], realizó un estudio sobre las tecnologías aplicadas por ALCAN (empresa de alúmina más importante de Canadá) para la evaporación del licor cáustico, la cual emplea espesantes para producir un residuo de densidad de sólidos suficiente para comportarse como una suspensión no segregante y evaporadores denominados “G3” que concentran el licor cáustico. En el sistema se recuperan productos químicos utilizados en el refinamiento de la bauxita extraída de la producción de alúmina. El condensado limpio producido por el sistema se recicla de nuevo en el proceso para el lavado de efluentes y reducir la ingesta de agua a la planta.

CVG Bauxilum (2003) ^[38], realizó una evaluación de amenazas y vulnerabilidad desde el punto de vista geoquímico de las lagunas de lodos rojos y consideró niveles de pH y alcalinidad en lagunas naturales del río Orinoco cercanas a los diques de las lagunas de los lodos rojos, indicó la existencia de áreas impactadas con alto pH y alcalinidad proveniente de la percolación y lixiviación de licor cáustico hacia el río Orinoco. (Figura 12).

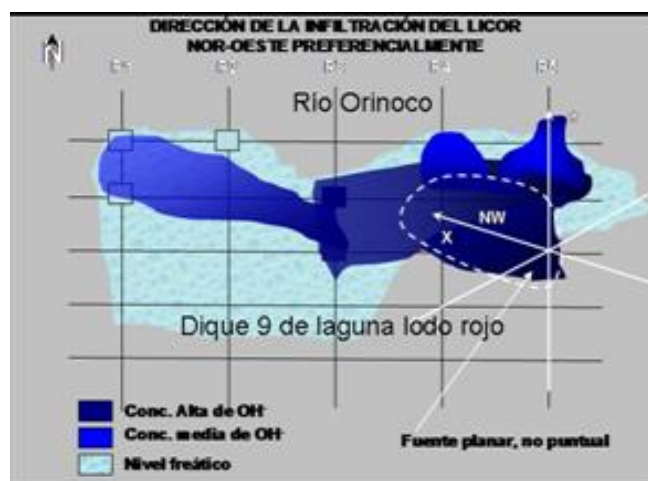


Figura 12. Área sometida al estudio de vulnerabilidad. Playa Laguna de Punta Cuchillo/Frente al Dique 9

François (2005) ^[39], realizó una presentación sobre un sistemas de evaporación natural acelerado como una alternativa de tratamiento de riles vitimínicos (Figura 13). El sistema de evaporación consiste en: un estanque de recuperación y bombeo del ril, separador de sólidos, estanque de almacenamiento, panel de evaporización con circuito de regadío y un circuito de lavado automático. Este sistema ofrece una alternativa económica, no genera lodos activos, reduce espacios, consumo constante y es un proceso simple, natural, estable y fiable. Con el fin de forzar el sistema para aquellas zonas más heladas, de alta precipitación o de poco viento se propuso un sistema de ventilación que aumente la tasa de evaporación al hacer circular la masa de aire superficial que contiene alta humedad.

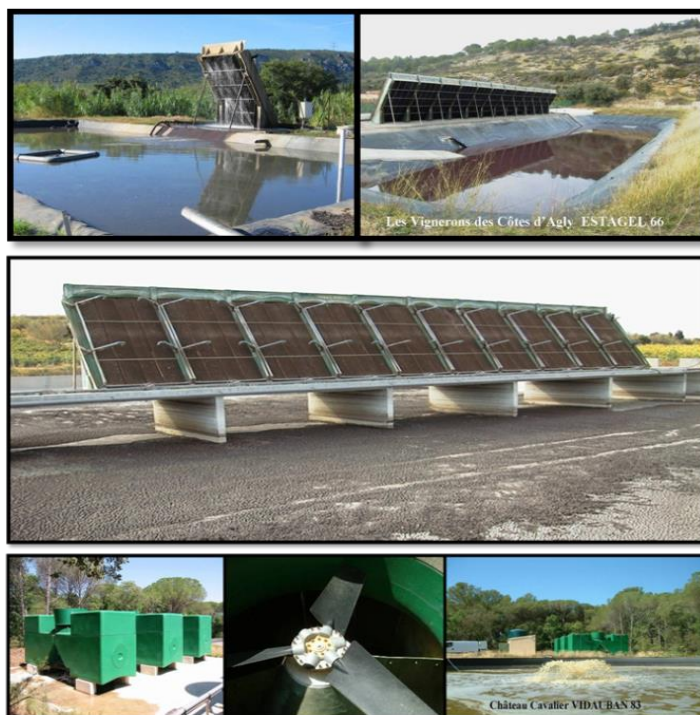


Figura 13. Sistemas de evaporación natural acelerado como una alternativa de tratamiento de riles vitimínicos

Chacón (2008) ^[40], llevó a cabo una propuesta que se basó en un tratamiento físico para el hidróxido de sodio en desechos industriales. Dicho tratamiento consistió en un sistema de evaporación basado en las características físicas de los componentes mineralógicos que conforman el lodo rojo y las características químicas del licor cáustico y determinó, por la complejidad de la composición, que se pudiese emplear un evaporador de películas finas agitadas que pudiese obtener un desecho en menor cantidad y de fácil manejo, haciendo que el lodo rojo se convierta en el punto de partida para otras aplicaciones.

Power y colaboradores (2011) ^[41], llevaron a cabo un estudio de gestión, eliminación y almacenamiento de residuos de bauxita, donde se basaron en los métodos aplicados actualmente por las más grandes empresas de alúmina del mundo. Una se basa en la

remediación con agua de mar y la otra en los apilamientos en seco. Obtuvieron que los principales factores que determinan la elección del método de eliminación de residuos de una refinería son: las precipitaciones locales y la topografía; la disponibilidad de tierras, el tamaño de la refinería, los requisitos legales y los aspectos económicos del transporte frente al bombeo. Las ventajas de la remediación con agua de mar se basan en que es un método sencillo donde los iones hidróxido, carbonato y aluminato son retirados de la solución por la reacción con Mg^{2+} y Ca^{2+} , para formar sólidos alcalinos particulares, como carbonato de calcio ($CaCO_3$) e hidrotalcita ($Mg_6Al_2(CO_3)(OH)_{16} \cdot 4(H_2O)$), amortiguando la solución en un intervalo de pH 8-9. Como desventaja se obtiene que el proceso sea dificultoso para aquellas industrias lejanas a áreas costeras. Las ventajas de apilamiento son: los requerimientos de terreno para el almacenamiento se reducen al mínimo, soda y alúmina en el licor se puede recuperar, y disminución de lixiviados. Sin embargo éste último proceso presenta las siguientes desventajas: las superficies secas están sujetas a formación de polvos fugitivos, difícil de lograr en zonas de alta precipitación, evaporación neta baja y la densidad de compactación significativa dificulta el establecimiento de la vegetación.

4. OBJETIVOS

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de variables meteorológicas en el diseño de un sistema acelerado de evaporación forzada del pasivo licor cáustico procedente del proceso Bayer, como alternativa de prevención de impacto ambiental a través de la disminución del volumen de las lagunas de licor por evaporación del agua.

4.2 Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades fisicoquímicas del licor cáustico (alcalinidad y pH).
- Evaluar un sistema de evaporación acelerado y forzado a escala de laboratorio, mediante el suministro de aire y calor.
- Estimar la influencia de variables meteorológicas (HR%, temperatura, radiación solar y velocidad del viento) en el modelaje del sistema acelerado de evaporación forzada.
- Determinar mineralógicamente las sales obtenidas de la evaporación.

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.1 Medición del pH

Se realizó con un equipo denominado pH-metro, marca Thermo Electron Corporation, modelo Orion 4 STAR. pH-Conductivity Portable (Figura 14), a 100 mL de muestras de licor cáustico provenientes de las lagunas 1, 2 y 3 ubicadas en Cambalache – Ciudad Bolívar.



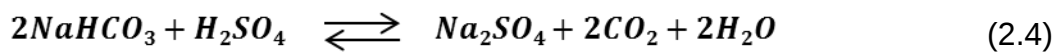
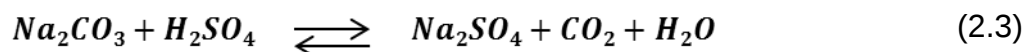
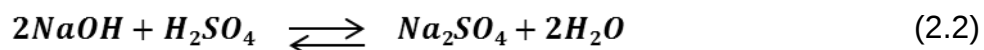
Figura 14. pH-metro Thermo Electron Corporation, modelo Orion 4 STAR

5.2 Determinación de la alcalinidad del licor cáustico

La determinación de la alcalinidad del licor cáustico se llevó a cabo mediante titulación vía húmeda, empleando NaOH 0,1966N (0,1966 M) para la estandarización de 1 L de solución de ácido sulfúrico, con el que se procedió a titular una muestra de licor cáustico y agua destilada, para obtener por medio del cálculo estequiométrico, la concentración de carbonatos e hidróxidos presentes en la muestra, es decir, la alcalinidad del licor cáustico como Na_2CO_3 , CaCO_3 y NaOH. Los instrumentos empleados fueron una bureta de 25 mL para la estandarización del ácido sulfúrico y titulación del agua destilada, una bureta de 50 mL para la titulación del licor cáustico y fioles de 100 mL.

La titulación del agua destilada se realizó con la finalidad de corregir la alcalinidad total del licor cáustico dado como Na_2CO_3 y Ca_2CO_3 , los cuales se forman por la reacción con el CO_2 del medio ambiente. Los indicadores empleados fueron fenolftaleína, con el que se observó el primer punto de equivalencia a través de la desaparición del color púrpura característico y naranja de metilo, con el que se observó el segundo punto de equivalencia al ocurrir el cambio de coloración de anaranjado a salmón.

Las reacciones involucradas son:



5.3 Determinación de la densidad del licor cáustico

Para la determinación de la densidad de una muestra de licor cáustico se empleó un Hidrómetro marca ERTCO Precision, calibrado y manufacturado bajo las normas del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST). Se comprobó la eficiencia del instrumento con agua destilada y luego se determinó la densidad del licor cáustico a temperatura ambiente por medio del procedimiento esquematizado en la Figura 15.

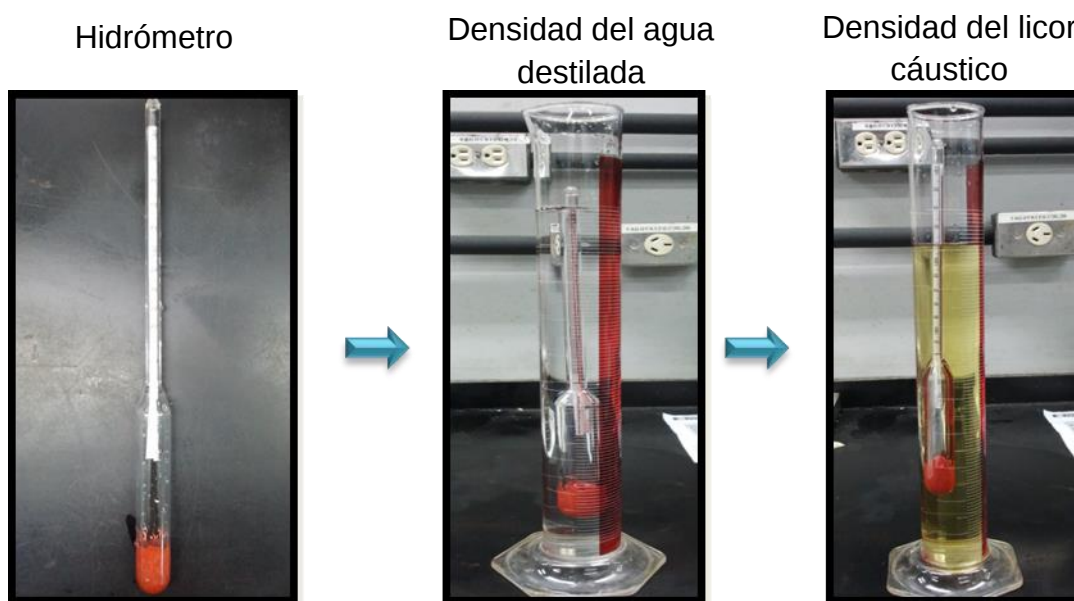


Figura 15. Determinación de la densidad de una muestra de licor cáustico

5.4 Análisis de la disminución de la conductividad del licor cáustico para acelerar el proceso de formación de cristales de carbonato en el sistema de evaporación

Para la disminución de la conductividad del licor cáustico y poder obtener la variación de la misma en función de la concentración, se procedió a emplear 25 mL de muestra procedente de la laguna 2. Se vertió gota a gota etanol por medio de una bureta de 25 mL al licor con agitación magnética y se midió la conductividad respectiva con un pH-Conductivity, marca Thermo Electron Corporation, modelo Orion 4 STAR como se muestra en el esquema de la Figura 16.

Medición de la disminución de la conductividad

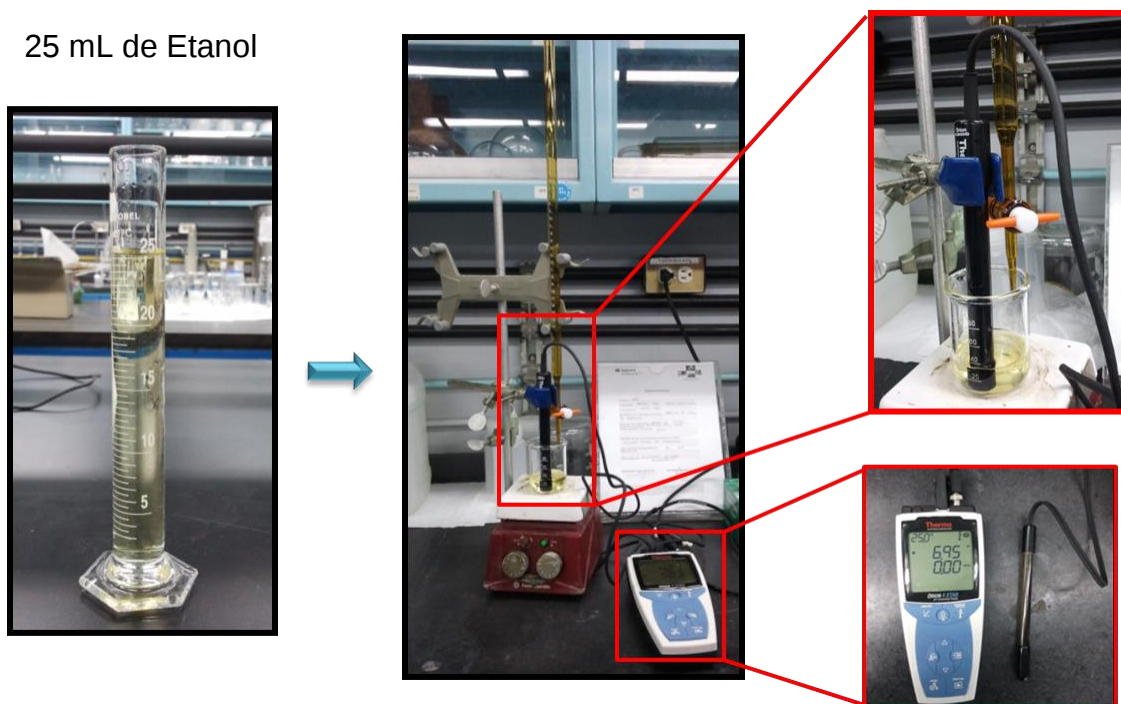


Figura 16. Esquema del procedimiento experimental para el estudio de la disminución de la conductividad del licor cáustico

Se empleó etanol para la disminución de la conductividad del licor cáustico ya que éste último presenta una alta concentración de carbonato y bicarbonato en solución, los cuales no son solubles al aumentar el agregado de etanol durante el proceso de medición, precipitando de ésta manera las sales y provocando una variación de la conductividad.

5.5 Determinación de los hábitos cristalinos más estables del carbonato de sodio (Na_2CO_3) por evaporación en horno

Se realizó la evaporación de 2 mL de muestras de licor cáustico en un horno marca Microware Muffle Furnace, modelo Phoenix, esto con el fin de observar:

- El tiempo que toma evaporar completamente una muestra de licor cáustico.
- Los hábitos cristalinos a una temperatura determinada.
- El porcentaje de cristales en solución.

El procedimiento se inició pesando un recipiente de aluminio y luego se determinó el peso de 2 mL de licor cáustico, por duplicado. Seguidamente, se introdujeron las muestras en el horno microonda fijando previamente la temperatura y se dejó evaporar hasta sequedad. Se midió la cantidad de líquido perdido durante la evaporación y por diferencia se determinó el peso de los cristales de carbonatos (Figura 18). Una vez evaporadas las muestras se analizaron los hábitos cristalinos a través de la identificación de fases por Difracción de Rayo X y se observó la morfología por Microscopía Electrónica de Barrido. En la Figura 17, se observa el horno empleado para la evaporación del licor cáustico.



Figura 17. Horno microondas para la evaporación del licor cáustico marca Microware Muffle Furnace, modelo Phoenix

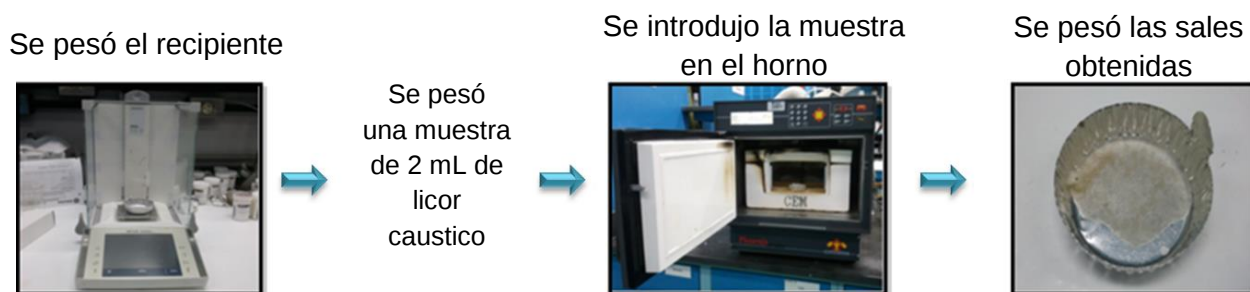


Figura 18. Procedimiento para la determinación de los hábitos cristalinos del carbonato de sodio por evaporación en horno

5.6 Evaluación del sistema acelerado de evaporación forzada

El efluente líquido denominado licor cáustico, procedente del proceso Bayer, fue colocado en un reservorio de retención primaria desde el cual fue bombeado, manteniendo un caudal fijo, hasta un aspersor hacia el sistema acelerado de evaporación forzada para la concentración de sales.

El sistema consta del suministro de radiación y viento artificial que son generados por una lámpara tipo foco y un ventilador respectivamente; el diseño esquematizado se representa en la Figura 19. El proceso conlleva a una rápida evaporación del agua contenida en el licor cáustico, concentrando de esta manera una solución rica en sales de carbonatos e hidróxidos. Los componentes principales que conforman el proceso son los siguientes:

- | | |
|--------------------------|------------------------------------|
| I. Panel de evaporación. | IV. Radiación (lámpara tipo foco). |
| II. Aspersor. | V. Laguna de evaporación. |
| III. Ventilador. | |

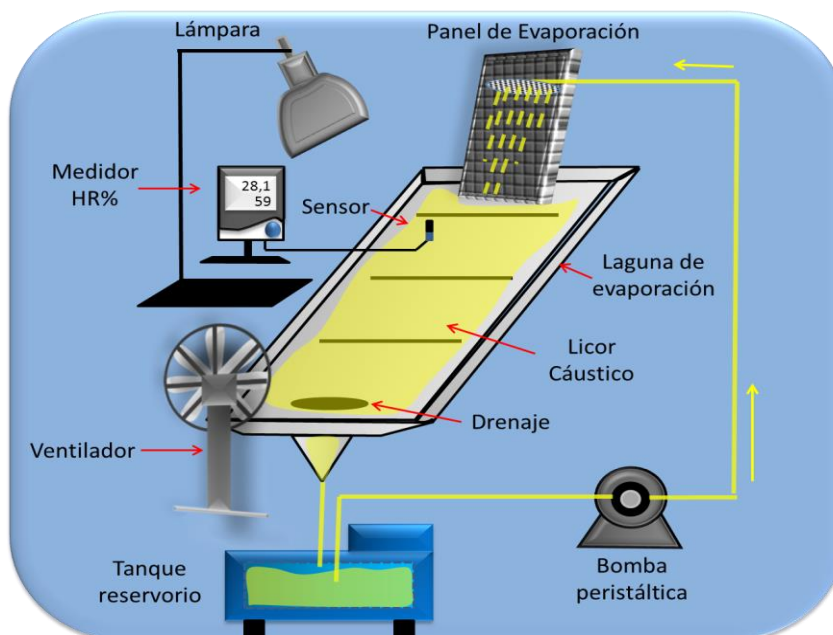
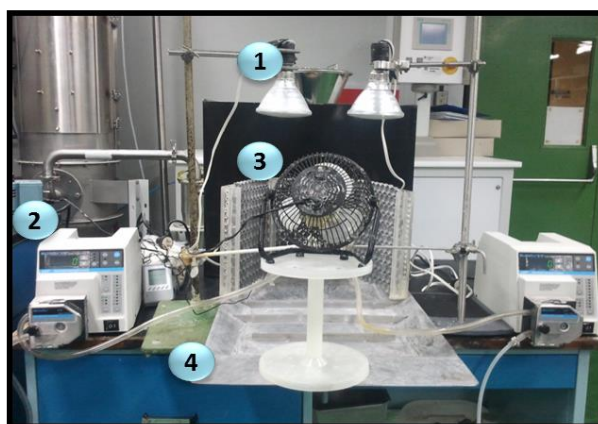


Figura 19. Esquema del sistema acelerado de evaporación forzada



- | | |
|-------------------------|---------------------|
| 1 Lámpara | 5 Panel |
| 2 Bomba Peristáltica | 6 Aspersor |
| 3 Ventilador | 7 Tanque reservorio |
| 4 Laguna de evaporación | |

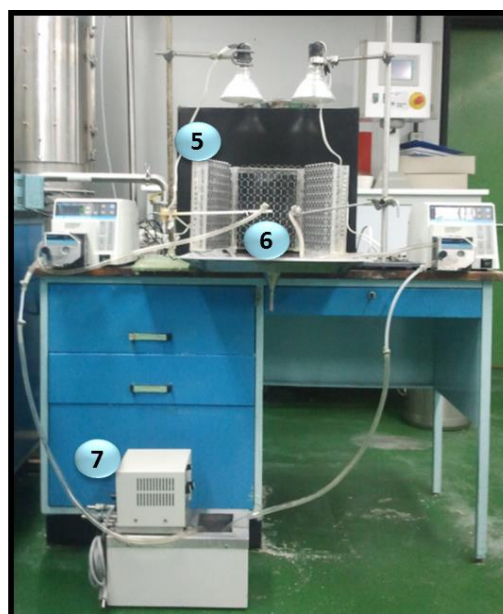


Figura 20. Sistema real acelerado de evaporación forzada

5.7 Equipo y materiales

5.7.1 Laguna

El sistema reservorio de licor cáustico empleado como laguna fue construido en acero inoxidable y presentó las siguientes dimensiones como se muestra esquematizado en la Figura 21.

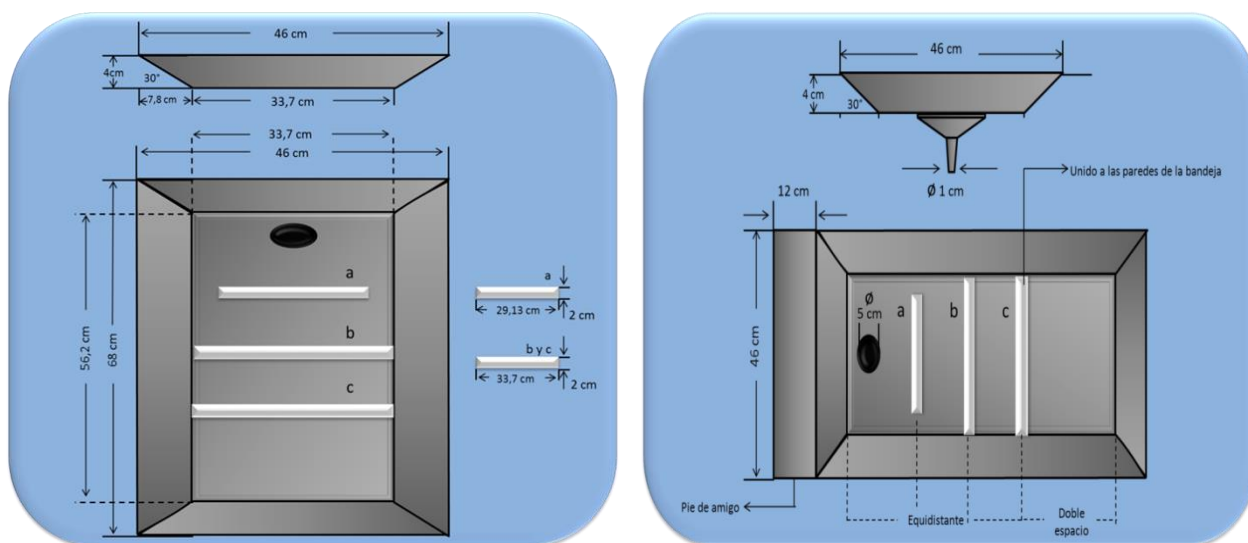


Figura 21. Diseño esquemático de la laguna de licor cáustico y dimensiones

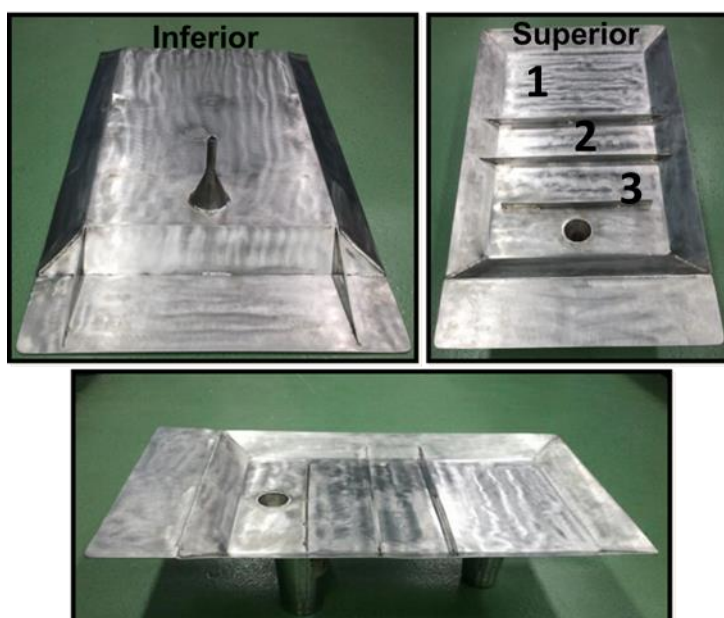


Figura 22. Laguna de licor cáustico construida en acero inoxidable

En la Figura 22 se observa que en el interior de la laguna se incorporaron unas barras de acero inoxidable para aumentar el tiempo de retención del efluente líquido sobre la misma, de manera de favorecer la incidencia de los factores meteorológicos simulados, es decir, viento y radiación. A su vez constó de un orificio conectado a un embudo en la base de la laguna que condujo al líquido hacia un sistema de bombeo que lo recirculó hacia el panel.

5.7.1.1 Cálculo de las áreas

- Área de la base (A_2)
- Área de la corona (A_1)

La laguna tiene la forma geométrica de una pirámide de base rectangular truncada. La altura de la laguna (H) fue de 4,0 cm, con un largo (L_1) exterior de 68,0 cm, largo interior

(L_2) de 56,2 cm y un ancho (b) de 46,0 cm. El cálculo del volumen para la laguna, se llevó a cabo de la siguiente manera:

$$A_{Laguna} = A_1 = L_1 \cdot H \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$A_2 = L_2 \cdot b \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$Volumen_{Laguna} = \frac{H}{3} \cdot (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2}) \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Con una relación de largo por ancho de:

$$Rel_{laguna} = \frac{L}{A} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

5.7.2 Panel

El sistema de paneles fue construido de acero inoxidable en forma de rejilla (panel de abeja) para aumentar el área superficial y por lo tanto la retención de líquidos en su trama. La forma alveolar con buen perfil aerodinámico beneficia la energía cinética del aire. Las dimensiones de cada panel individual fueron: 21,5 cm de ancho, 28,0 cm de largo y 1,3 cm de profundidad. Cada hexágono tiene una arista de 1,3 cm dando un área superficial aproximada de 1896,18 cm² (18,9618 m²) por panel individual, como se muestra esquemáticamente en la Figura 23. El sistema comprendido por tres (3) paneles posee un área superficial aproximada de 5688,54 cm² (56,8854 m²).

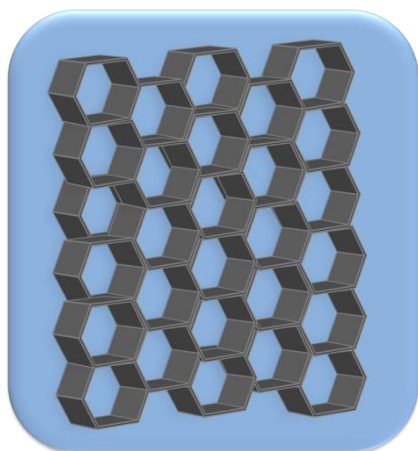


Figura 23. Diseño esquematizado del panel alveolar



Figura 24. Panel alveolar construido en acero inoxidable

5.7.3 Porta-panel

Se empleó como soporte del panel un equipo plástico, conocido en ingeniería como polimetilmetacrilato (Plexiglás, nombre comercial), el cual se caracteriza por su transparencia, resistencia al impacto, dureza y facilidad de mecanización.

La pared posterior del soporte está sellada para disminuir las pérdidas de licor cáustico durante la aspersion. El diseño y las medidas correspondientes se muestran esquematizados en la Figura 25.

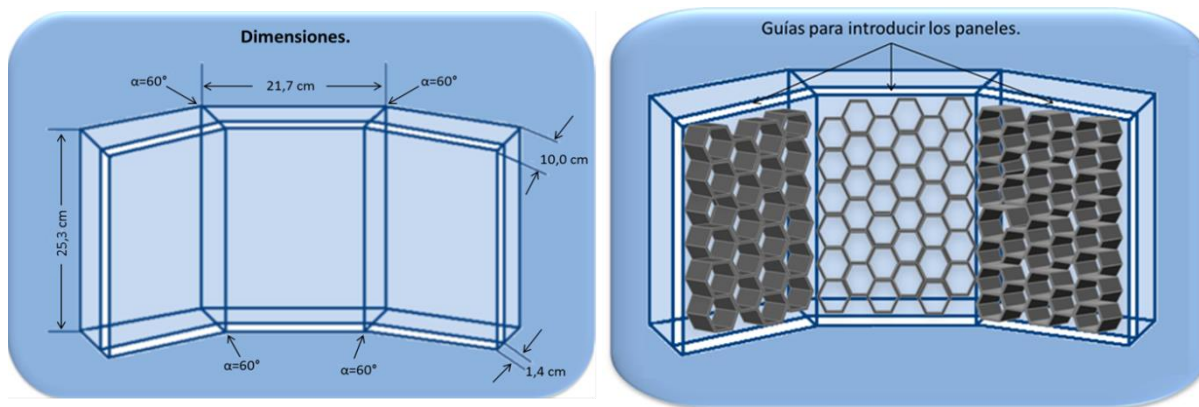


Figura 25. Diseño esquematizado del porta-panel y dimensiones

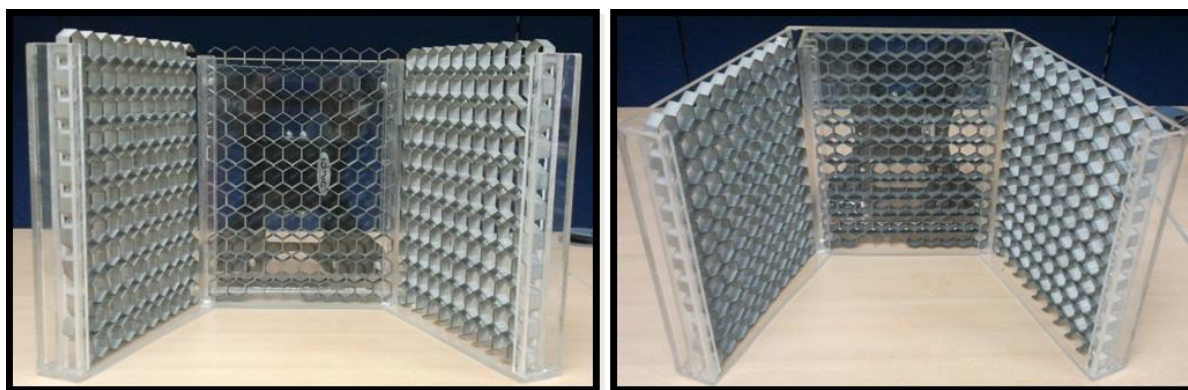


Figura 26. Porta-panel construido en Plexiglás

5.7.4 Aspensor

El aspensor empleado para la recirculación del licor cáustico desde la laguna y el tanque reservorio hacia los panales de evaporación fue de tipo MONARCH F-80, el cual produce una mejor ruptura del agua a presión directa. No emplea aire o vapor de agua como medio atomizador y funciona satisfactoriamente con una presión mayor a 40 PSI.

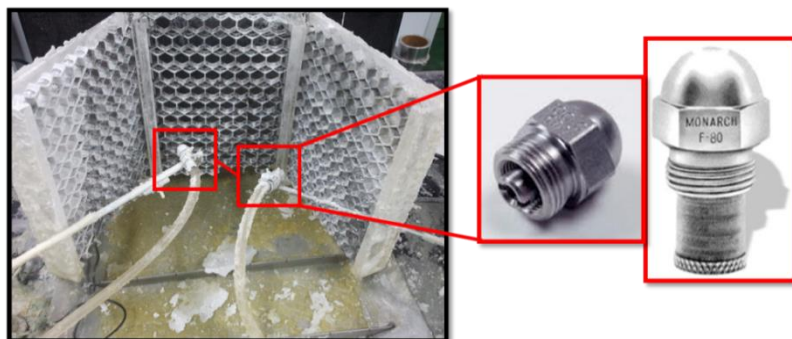


Figura 27. Aspensor MONARCH F-80

5.7.4.1 Cálculo del caudal

El caudal promedio del licor cáustico que llega al aspensor se obtuvo al aplicar la ecuación (4.0), la cual relaciona el volumen con el tiempo.

$$Q = \frac{V}{T} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (\text{Ec. 4.0})$$

5.7.5 Bomba Peristáltica

Se empleó una bomba peristáltica con una velocidad regulada a 120 mL/min, Marca: *Masterflex* L/S. Coputerized Prive. Modelo 77250-62. Mangueras *Masterflex* 6409-24 TYGON®. Mfg by Norton.

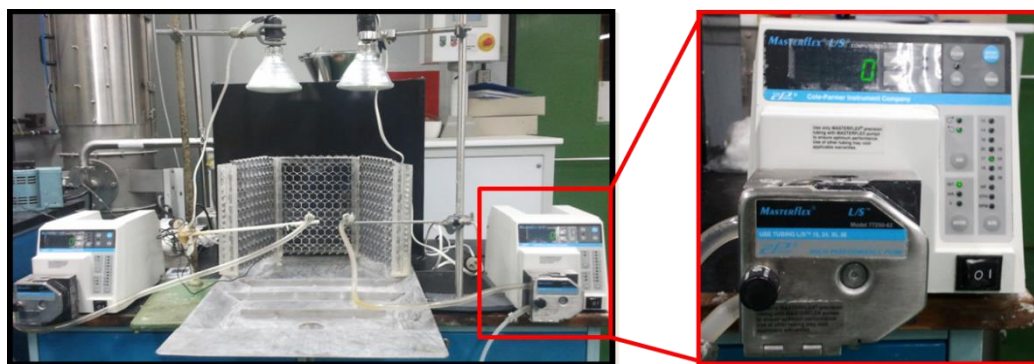


Figura 28. Bomba Peristáltica

5.7.6 Medidor de Velocidad del viento

Equipo Therno – Anemometer. Marca EXTECH Instruments.



Figura 29. Anemómetro

5.7.7 Medidor de radiación

Radiómetro Ligh Meter. LI – COR.
(Quantum radiometer/Photometer).

Modelo LI – 189



Figura 30 Radiómetro

5.7.8 Medidor de humedad relativa/temperatura

Marca Hanna, modelo HT-9218



Figura 31. Medidor de humedad relativa/temperatura

5.8 Dispositivos para simular los factores meteorológicos

- Lámpara tipo foco de 100 W/120V
- Ventilador de dos velocidades de 6" y 120 V



Figura 32. Lámpara (Radiación)



Figura 33. Ventilador (Viento)

5.9 Medición de la velocidad del viento

La medición de la velocidad del viento se realizó a una distancia de 35 cm entre el aspersor y el ventilador, como se muestra esquematizado en la Figura 34.

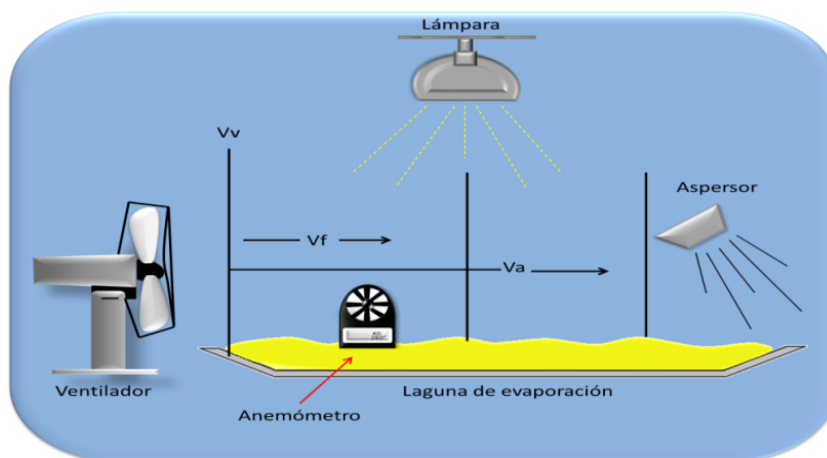


Figura 34. Esquema para la medición de la velocidad del viento

5.10 Medición de la Radiación

La medición se realizó sobre la superficie abierta de la laguna de evaporación bajo radiación térmica, a una altura de la lámpara de tungsteno de 40 cm donde se obtuvo el resultado más próximo a la radiación de Puerto Ordaz – Estado Bolívar, como se muestra esquematizado en la Figura 35.

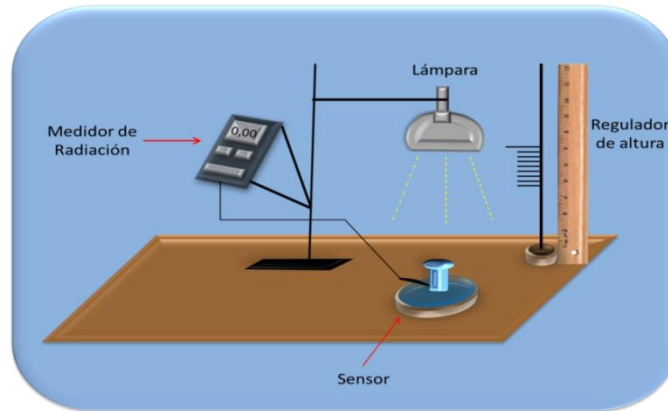


Figura 35. Esquema para la medición de la Radiación

5.11 Capacidad de evaporación del sistema modelado

- Medición de la evaporación sin viento y sin radiación
- Medición de la evaporación con viento y sin radiación

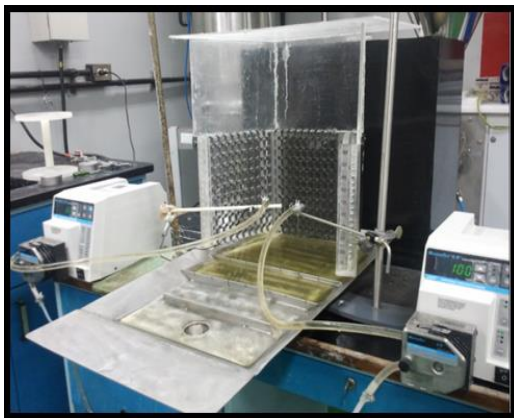


Figura 36. Experimento 1



Figura 37. Experimento 2

- Medición de la evaporación con viento y radiación

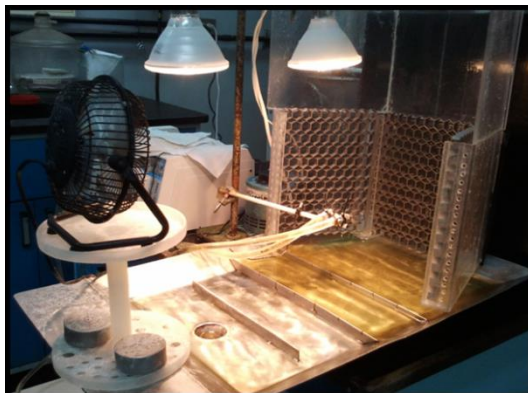


Figura 38. Experimento 3

Condiciones (Monitoreo cada dos horas)

- Determinación de la humedad relativa, temperatura e índice de refracción,
- Medición del volumen del licor cáustico,
- Separación de las sales precipitadas para su evaluación.

5.12 Determinación de la concentración del licor cáustico a través del índice de refracción

Se determinó la concentración de carbonato de sodio en el licor cáustico en los experimento 1, 2 y 3, tras el monitoreo de las tasas de evaporación cada dos horas a través de la medición del índice de refracción con un equipo marca ATAGO 1T, modelo NAR – 1T. (Figura 39).

Para la obtención de un blanco que permitió comparar los índices de refracción dado por las muestras de licor cáustico y así determinar la concentración, se preparó una solución de carbonato de sodio disolviendo 22,1590 g al 99,9% de pureza en 1 L de agua destilada con la que se procedió a realizar la representación gráfica de la variación del índice de refracción versus concentración.



Figura 39. Medidor del índice de refracción

5.13 Análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés)

Con la finalidad de analizar las sales obtenidas en la evaporación del licor cáustico se hizo un análisis termogravimétrico basado en la medida de la variación de la masa de una muestra cuando es sometida a un programa de temperatura en una atmósfera controlada. El equipo empleado fue un Thermogravimetry (TGA), marca SETARAM Instrumentation. KGP technologies. El procedimiento seguido para el TGA se muestra en la Figura 40.

Se pesó la muestra
en el crisol de
alúmina



Se introdujo la muestra en el
balancín del equipo



Se ajustó las condiciones de
temperatura y presión para la
obtención de los resultados
termogravimétricos



Figura 40. Análisis termogravimétrico

5.14 Síntesis del percarbonato de sodio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$)

Se colocó 135 mL de H_2O_2 al 30% en un beacker de 500 mL, se agitó con una barra magnética lentamente y luego se adicionó 104,1552 g del producto obtenido de la evaporación del licor cáustico del experimento 3, ensayo 1, en proporciones de 25 g aproximadamente, previamente triturado y homogenizado a temperatura ambiente bajo campana. Una vez disuelta la muestra se vertió etanol absoluto lentamente hasta completar los 100 mL. El precipitado blanco obtenido se separó por filtración en un filtro

prensa y se lavó con etanol. El sólido se secó finalmente al aire a temperatura ambiente. En la Figura 41 se muestra el procedimiento experimental.

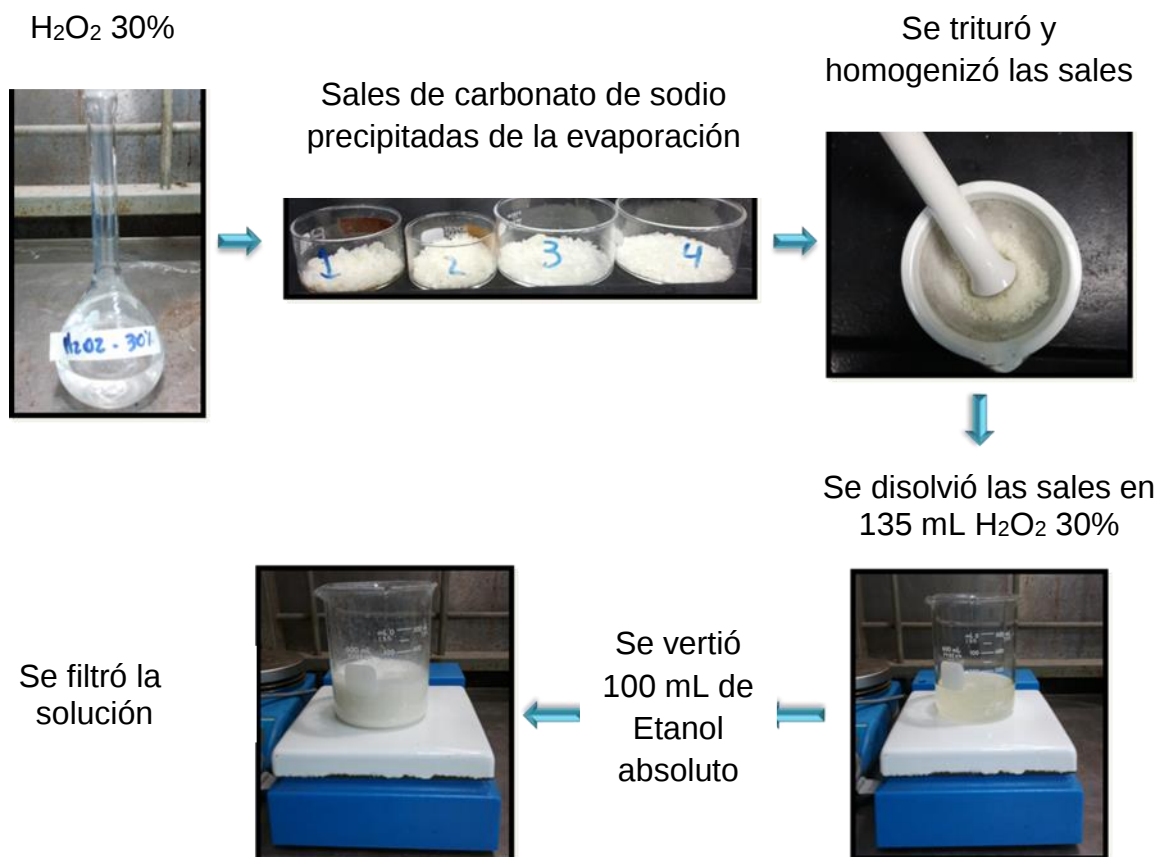


Figura 41. Procedimiento experimental para la síntesis de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$

5.14.1 Determinación de oxígeno disuelto en $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$

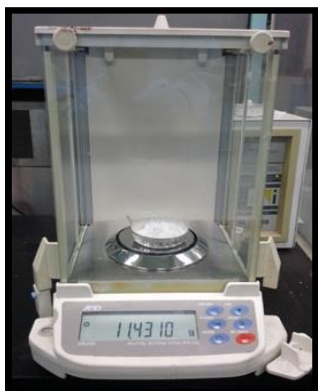
Para la medición de oxígeno disuelto en el percarbonato de sodio sintetizado a partir de las sales obtenidas de la evaporación del licor cáustico, se procedió a emplear un equipo denominado Medidor de oxígeno disuelto, Modelo YSI 5000. (Figura 42).



Figura 42. Medidor de oxígeno disuelto, Modelo YSI 5000

El procedimiento consistió en pesar 10 g de muestra del producto comercial Nevex, el cual contiene 33% de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ para ser comparado en la medición del compuesto sintetizado. Se disolvió la muestra por medio de agitación magnética en 300 mL de agua destilada y se vertió en una botella Wheaton. Finalmente, se introdujo el sensor de medición de oxígeno para la determinación de la concentración en mg/L (ppm). El mismo procedimiento se repitió para la muestra de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ sintetizado. En la Figura 43 se muestra el esquema experimental realizado.

Se pesó 10 g de muestra



Se disolvió en 300 mL de agua con agitación magnética



Se introdujo el medidor de oxígeno



Se midió el oxígeno disuelto en solución

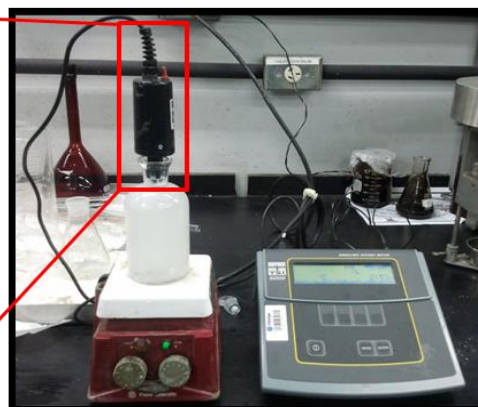


Figura 43. Procedimiento experimental para la medición de oxígeno disuelto

5.15 Análisis por Difracción de Rayos X (DRX)

Se utilizó un equipo de Difracción de Rayos X, marca PANalytica, modelo X'PERT PRO con ánodo de cobre, para identificar las facies estructurales de las sales formadas en la evaporación del licor cáustico. El equipo empleado se muestra en la Figura 44.



Figura 44. Equipo de difracción de rayos X, X'Pert Pro de PANalytical

5.16 Análisis por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Se empleó un microscopio electrónico de barrido, marca FEI, modelo QUANTA FEG 250, con un detector de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS o EDX) para análisis elemental marca EDAX, como se observa en la Figura 45. Se tomaron microfotografías de las sales de carbonatos, para observar su hábito cristalino, así como algún tipo de alteraciones visibles, como cambios en la textura y deformaciones generadas por el sistema acelerado de evaporación forzada.



Figura 45. Microscopio electrónico de barrido FEI, QUANTA FEG 250

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1 Alcalinidad y pH del licor cáustico

La determinación de la alcalinidad a través de la valoración ácido-base realizado con ácido sulfúrico 0,1035 N (0,0518 M), previamente estandarización con NaOH 0,1966 N, permitieron obtener los resultados mostrados en la Tabla 5, cuyos valores fueron corregidos a través de la determinación de la alcalinidad proveniente del agua destilada (Tabla 4).

Tabla 4. Determinación de la concentración de CO_3^{2-} y HCO_3^- en el agua destilada y alcalinidad como CaCO_3 y Na_2CO_3

HCO_3^- (ppm)	CO_3^{2-} (ppm)	Na_2CO_3 (ppm)	CaCO_3 (ppm)
24 ± 1	17 ± 1	30 ± 1	28 ± 1

Tabla 5. Determinación de la concentración de CO_3^{2-} , HCO_3^- e OH^- en el licor cáustico y alcalinidad como CaCO_3 y Na_2CO_3

Muestra Laguna	CO_3^{2-} (ppm)	HCO_3^- (ppm)	NaOH (ppm)
1	114562 ± 790	81840 ± 564	54696 ± 377
2	114909 ± 847	82088 ± 605	54739 ± 403
3	115257 ± 194	82337 ± 139	54905 ± 93
Muestra	Na_2CO_3 (ppm)	CaCO_3 (ppm)	
1	144568 ± 996	136508 ± 941	
2	145007 ± 1069	136922 ± 1009	
3	145446 ± 245	137393 ± 232	

Siendo la alcalinidad equivalente al contenido de hidróxido (OH^-), bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}) ^[42] presentes en una solución, se puede observar en los resultados obtenidos que esta propiedad es principalmente aportada por la alta concentración de carbonato de sodio. Se esperaba que los niveles de alcalinidad y pH (Tabla 6), fueran producto de la concentración de iones hidróxido en solución, ya que éste representa el compuesto empleado en la digestión de la Bauxita, sin embargo, se conoce que en el proceso Bayer para la obtención de alúmina el sistema garantiza el mayor consumo de dicho compuesto dentro de la planta.

Los resultados obtenidos de la concentración de carbonato, bicarbonato e hidróxido en relación a la laguna 2 y 3 respaldan los resultados de los experimentos 1, 2 y 3, donde se obtuvo una mayor concentración a partir del índice de refracción y mayor cantidad de sales recolectadas en la laguna 3 respecto a la laguna 2.

Tabla 6. pH del licor cáustico

Laguna	1	2	3
pH	12,39	12,39	12,39

La medición del pH arrojó el mismo resultado para las tres lagunas y se debe principalmente a la presencia del ion CO_3^{2-} en solución. (Figura 46). ^[37]

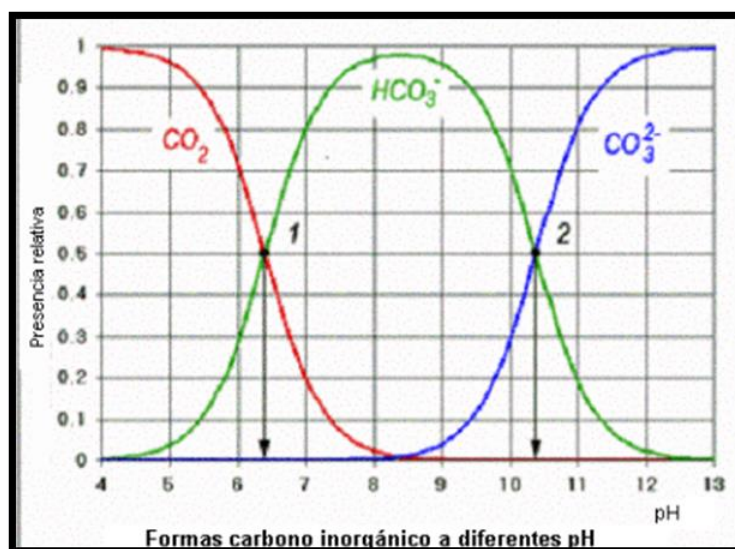


Figura 46. Efecto del pH en la composición de especies carbonatadas en soluciones acuosas

6.2 Determinación de la densidad del licor cáustico

La medición de la densidad del licor cáustico de la laguna 2 fue de 1,080 g/mL y 1,21 g/mL para la laguna 3 a 22,1 °C. El valor obtenido representa la masa de la sales contenida por mL de solución. Este resultado fue empleado para hallar la constante empírica de la ecuación de Dalton, que representa el coeficiente de conversión de energía por unidad de superficie en mm de agua que es capaz de evaporar esa energía, en la determinación de las tasas de evaporación teóricas del licor cáustico.

En la Figura 47, se muestra el gráfico que representa la concentración de carbonato de sodio en solución dado por la densidad y la temperatura. ^[43] Según los resultados obtenidos de densidad, el Na_2CO_3 se encuentra en solución en un 8% respecto a la laguna 2 representado por el punto rojo y 20% en la laguna 3 representado por el punto verde.

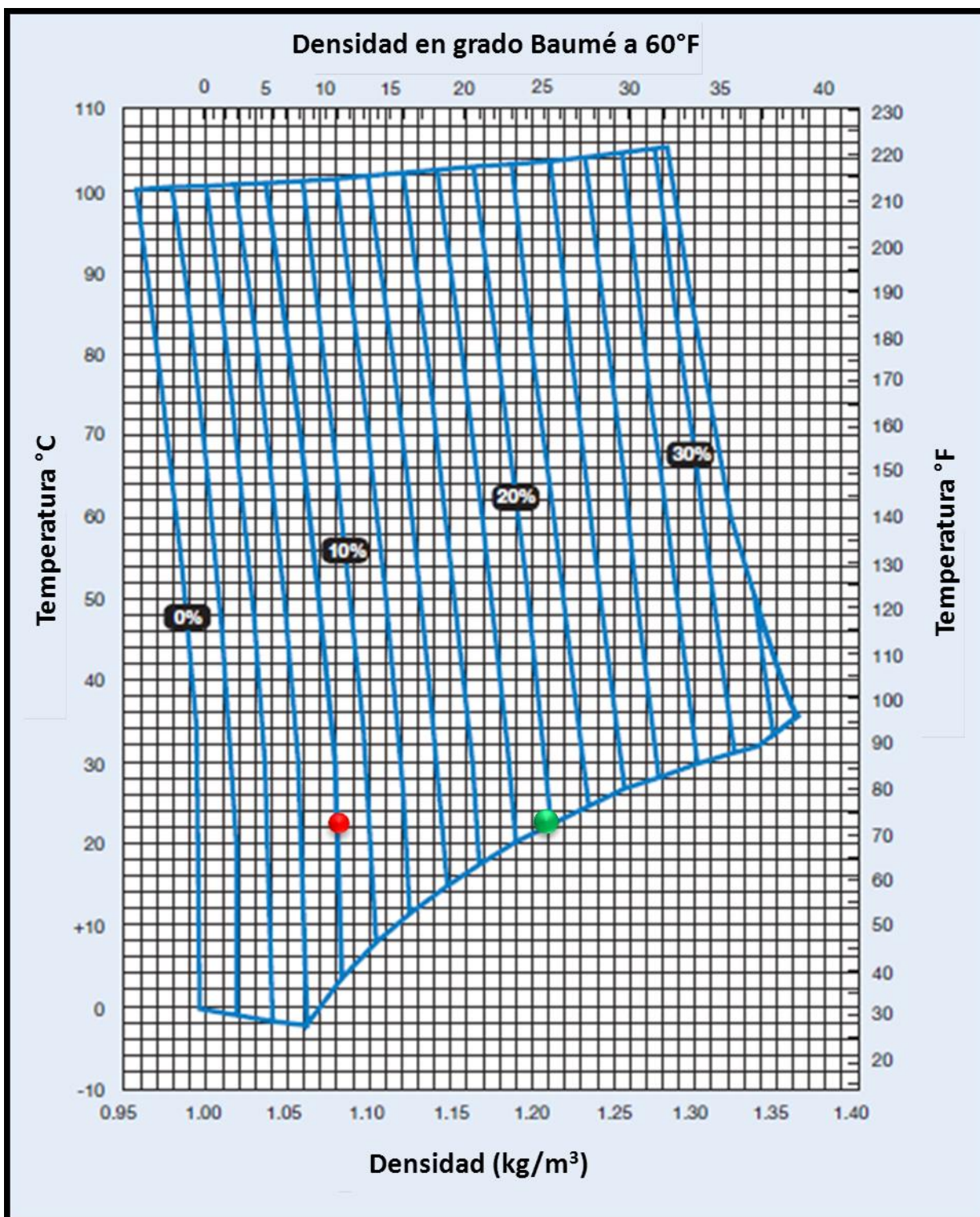


Figura 47. Concentración de Carbonato de sodio dado por la densidad y la temperatura

6.3 Análisis de la disminución de la conductividad del licor cáustico para acelerar el proceso de formación de cristales de carbonato en el sistema de evaporación.

El licor cáustico posee en solución cationes Na^+ y aniones carbonato CO_3^{2-} (Ver Reacción 2.5) con capacidad para conducir la electricidad, pudiendo ser medida a partir de un conductímetro, obteniéndose los resultados que se presentan a continuación.

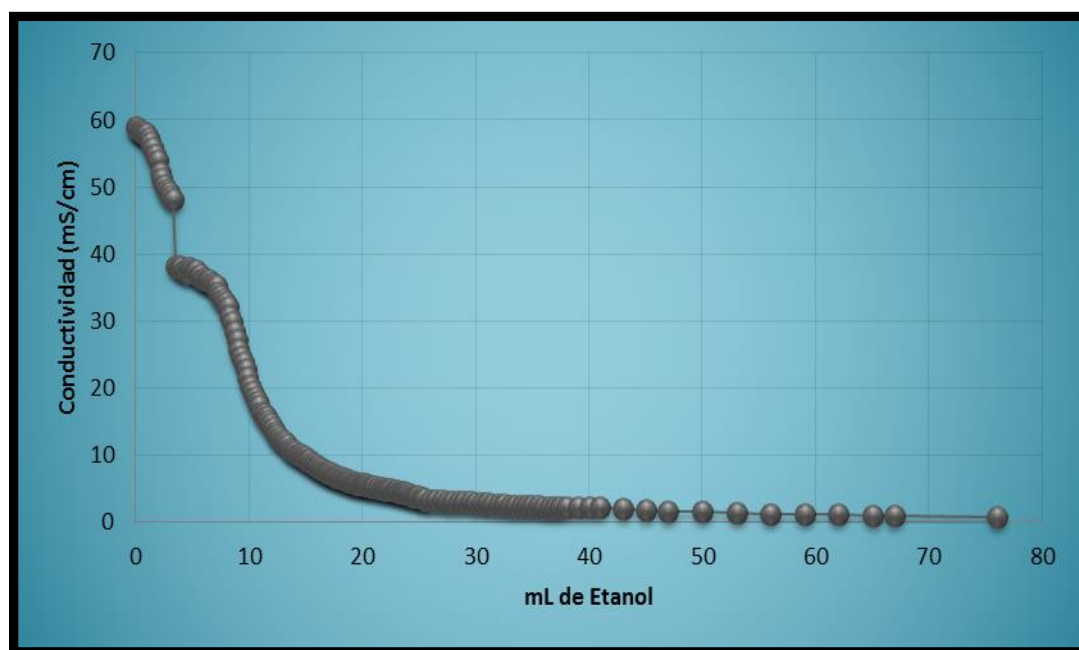
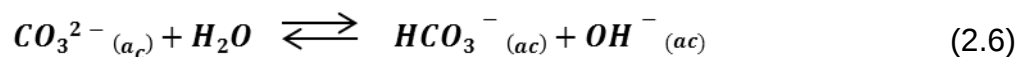
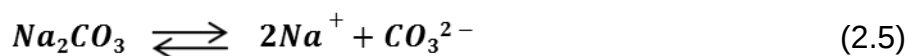


Figura 48. Disminución de la conductividad del licor cáustico por agregado de etanol

Como se muestra en la representación gráfica (Figura 48), la conductividad del licor cáustico disminuye conforme aumenta el volumen agregado de etanol. Esto se debe a que el carbonato es insoluble en el alcohol generando su precipitación a medida que la concentración del primero aumenta. ^[44] Entre 4,3 y 4,7 mL de etanol agregado se observa un punto de inflexión que representa el inicio de la precipitación del carbonato de sodio.

El estudio de la conductividad se realizó con la finalidad de poder contemplar el efecto de un compuesto orgánico, volátil, no tóxico y que genere disminución de ésta propiedad, para acelerar el proceso de cristalización de las sales de carbonato de sodio.

6.4 Determinación de los hábitos cristalinos más estables del carbonato de sodio (Na_2CO_3) por evaporación en horno

Para la determinación de los hábitos cristalinos más estables del carbonato de sodio se realizó la evaporación en horno de 2 mL de licor cáustico a diferentes temperaturas como se muestra en la Tabla 7.

Las muestras fueron analizadas por duplicado para una temperatura fija y se pudo observar que a medida que aumentó la temperatura disminuyó el tiempo que tomó el proceso de evaporación por el incremento de la energía cinética de las moléculas, venciendo la tensión superficial del líquido y pasando a la fase vapor con mayor facilidad y rapidez. ^[45] Las muestras señaladas en color rojo representan las escogidas para su caracterización por Difracción de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido.

Tabla 7. Obtención de los hábitos cristalinos más estables del carbonato de sodio

Ensayo	Muestra		Temp. (°C)	Tiempo (h)		Peso Muestra (g)	%p/v	Puntos de identificación para el diagrama de fases
				1	2	Promedio		
1	M.1.27	M.2.27	27	8	8	0,7155	35,7775	
2	M.1.30	M.2.30	30	8	8	0,6970	34,8500	
3	M.1.32	M.2.32	32	8	8	0,7190	35,9475	
4	M.1.34	M.2.34	34	8	8	0,8583	42,9150	
5	M.1.36	M.2.36	36	7	7	0,7920	39,6000	
6	M.1.38	M.2.38	38	7	7	0,7570	37,8500	
7	M.1.40	M.2.40	40	5	5	0,5411	27,0550	
8	M.1.42	M.2.42	42	5	5	0,6752	33,7600	
9	M.1.44	M.2.44	44	4	4	0,5820	29,1025	
10	M.1.46	M.2.46	46	4	4	0,7281	36,4050	
11	M.1.48	M.2.48	48	3	3	0,5775	28,8750	
12	M.1.50	M.2.50	50	3	3	0,7010	35,4975	
13	M.1.60	M.2.60	60	3	3	0,7496	37,4825	
14	M.1.80	M.2.80	80	2	2	0,6849	34,2450	
15	M.1.90	M.2.90	90	1	1	0,6873	34,3650	
16	M.1.100	M.2.100	100	0,75	0,75	0,6581	32,9050	
17	M.1.105	M.2.105	105	0,75	0,75	0,5945	29,7250	

En las Figura 49 y 50 se observan los resultados por DRX para las sales obtenidas de la evaporación entre los 27 y 30 °C. Se obtuvo el hábito cristalino decahidratado a 27 °C, sin embargo, hubo un mayor porcentaje de la forma cristalina monohidratada coincidiendo las líneas del difractograma de la muestra con los de la base de dato, éste resultado difiere con la información reportada en la bibliografía donde se obtiene mayoritariamente la forma con mayor número de moléculas de hidratación. [17] Esta variación se debe a las condiciones establecidas previamente en el horno empleado, donde se realizó la evacuación de la humedad a través de corrientes de aire seco, lo cual favoreció la obtención de un hábito cristalino de menor hidratación. El $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ contiene 85,48% de Na_2CO_3 y 14,52% de agua de cristalización. Pierde agua por calentamiento y se convierte en Na_2CO_3 al ser calentada en contacto con su solución saturada a 109 °C. [46]

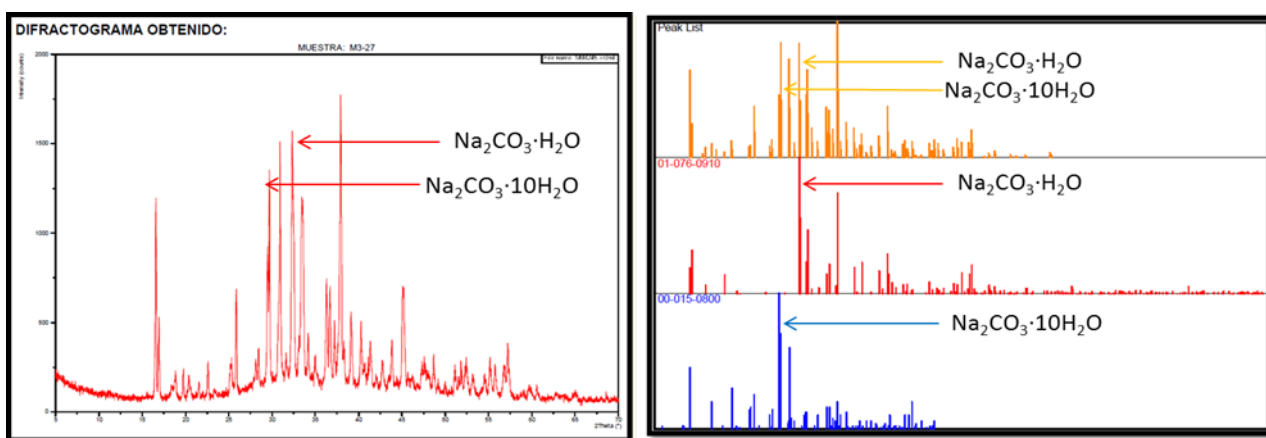


Figura 49. Resultados de DRX de sales obtenidas de la evaporación en horno a 27 °C

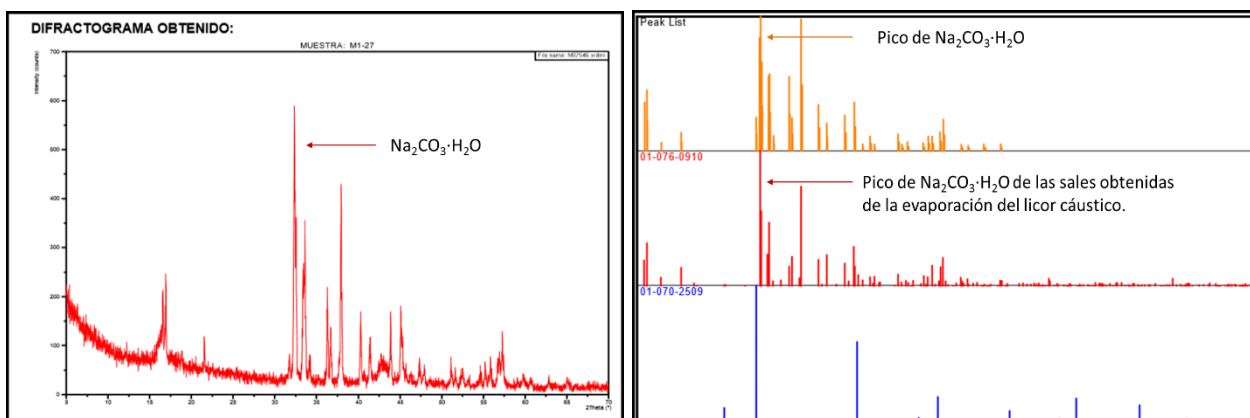


Figura 50. Resultados de DRX de sales obtenidas de la evaporación en horno a 30 °C

Se realizó el análisis por microscopía electrónica de barrido de las sales obtenidas de la evaporación a 27 y 30 °C para observar la morfología de los cristales como se muestra en las Figura 51 y 52.

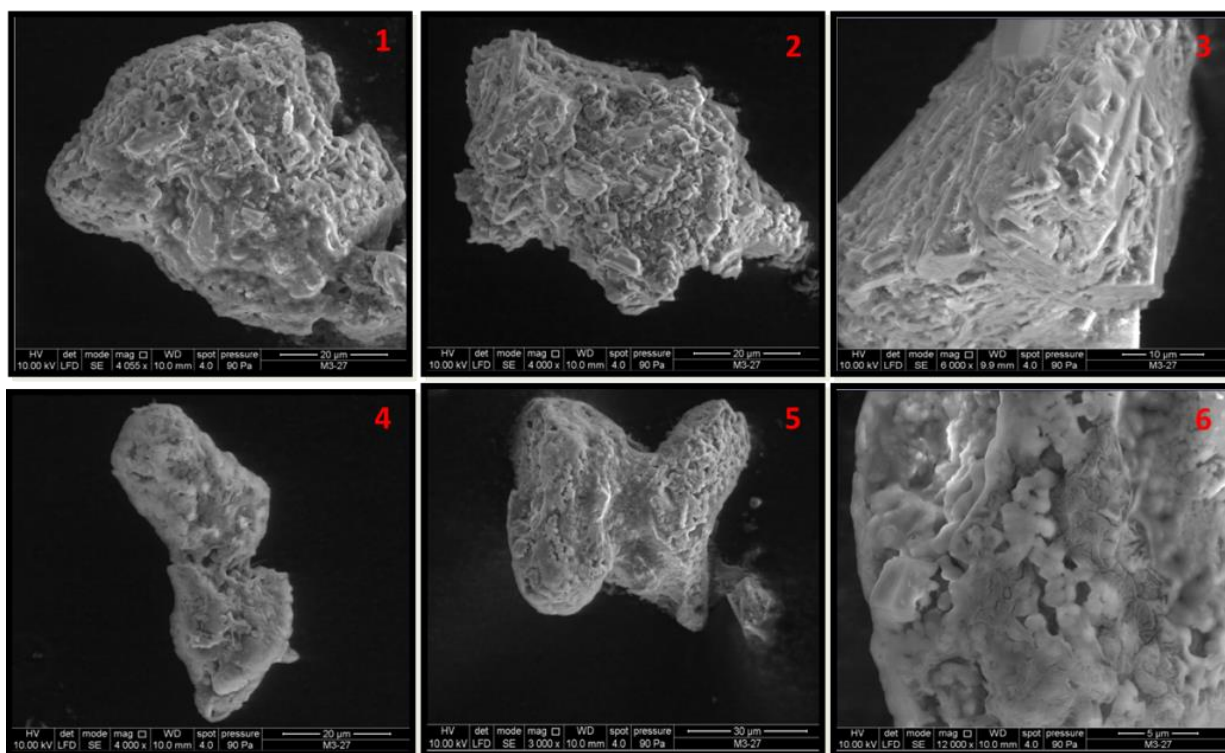


Figura 51. MEB de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ obtenidas a 27 °C

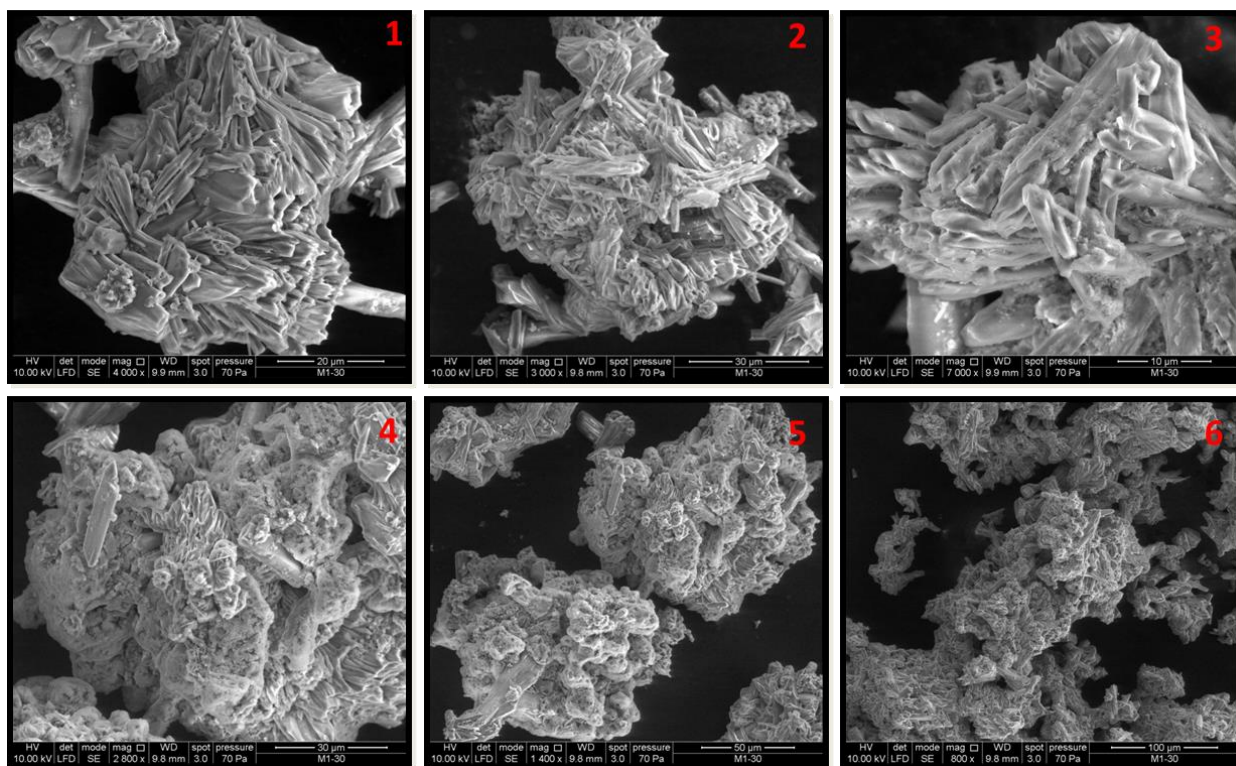


Figura 52. MEB de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ obtenidas a 30 °C

Los resultados obtenidos por MEB muestran, en las primeras tres imágenes de los cristales obtenidos a 30 °C, uniformidad en la formación de cristales de tipo ortorrómbico tubulares de sales monohidratadas del carbonato de sodio, conjuntamente, en las últimas tres imágenes y en los cristales obtenidos a 27 °C, se presentan cristales con estructuras semiamorfas producto del agua de cristalización, el cual no permitió la formación ortorrómbica del cristal.

Por medio del analizador EDS (Espectrómetro de Dispersión de Energía) de rayos X se identificó la distribución semi-cuantitativa de los elementos químicos que se presentan en la muestra, obteniendo principalmente oxígeno, sodio y carbono como se muestra en la Figura 53. Igualmente, el analizador EDS aporta información del porcentaje en peso (Wt%) y área (At%) de los compuestos identificados. (Tabla 8).

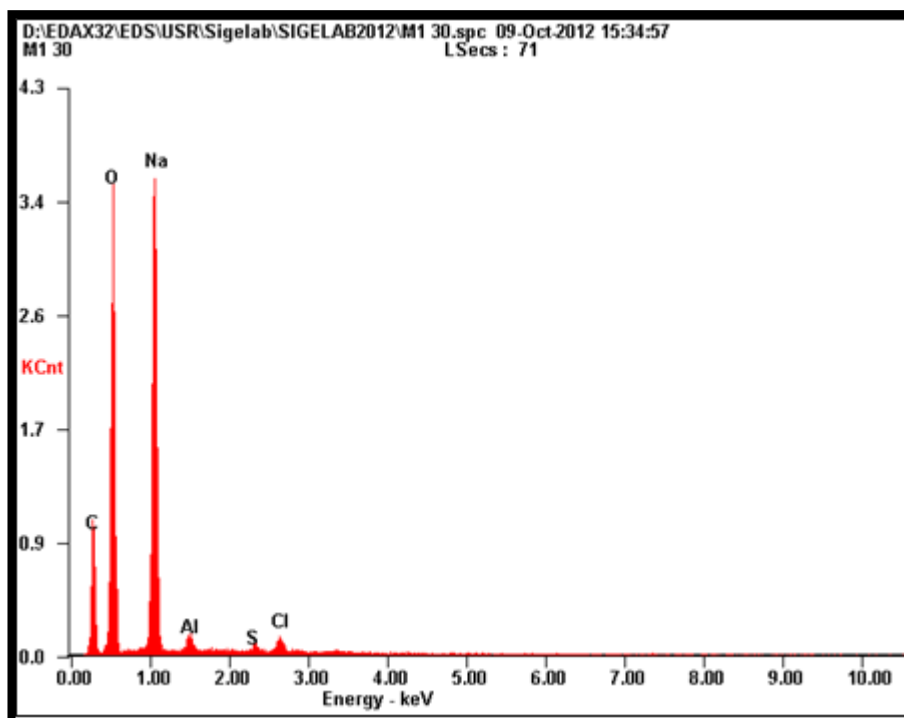


Figura 53. Análisis EDS de rayos X de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a 30°C

Tabla 8. Porcentajes de elementos identificados en la muestra de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a 30°C

Elemento	Wt%	At%
<i>C</i>	25,59	34,68
<i>O</i>	42,29	43,03
<i>Na</i>	29,54	20,91
<i>Al</i>	01,21	00,73
<i>S</i>	00,46	00,24
<i>Cl</i>	00,91	00,42

A 32°C se obtuvo tres hábitos cristalinos importantes, el monohidrato, heptahidrato y decahidrato por medio de dos ensayos realizados. Los resultados se observan en las Figuras 54 y 55 a continuación.

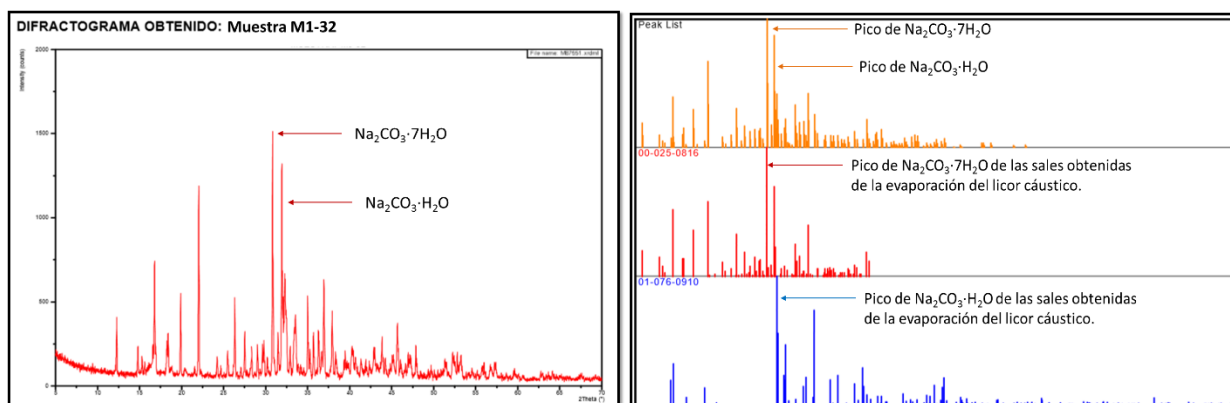


Figura 54. Resultados de DRX de sales obtenidas de la evaporación en horno a 32°C.

Ensayo 1

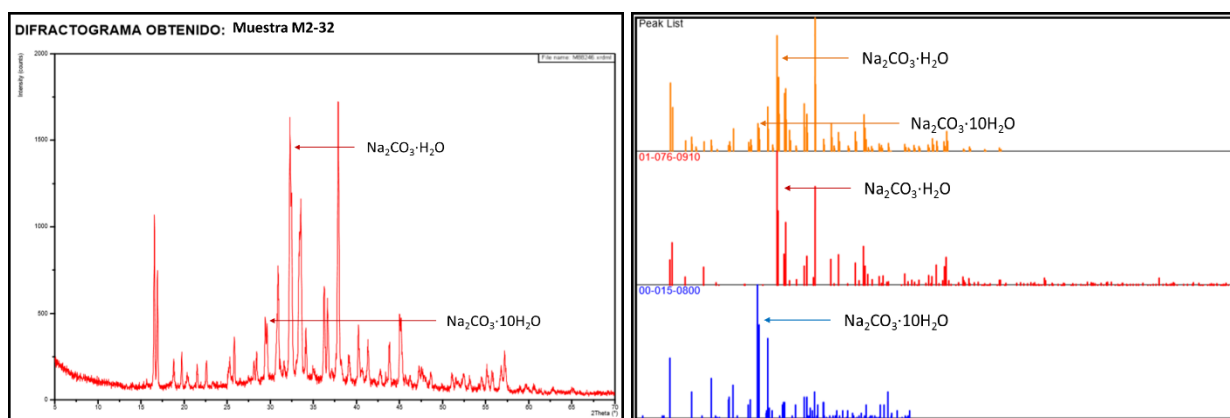


Figura 55. Resultados de DRX de sales obtenidas de la evaporación en horno a 32°C.

Ensayo 2

El carbonato de sodio heptahidratado ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) contiene 45,7% de Na_2CO_3 y 54,3% de agua de cristalización, sin embargo, no es muy estable entre los 32,0 y 35,4 °C (89,6 a 95,7°F). El carbonato de sodio decahidratado ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), comúnmente llamado “soda ash” o “sosa”, forma cristales grandes, eflorescentes (liberación de agua con exposición a la atmósfera) y transparentes; contiene: 37,06% Na_2CO_3 y 62,94% de agua de cristalización. Puede cristalizarse a partir de soluciones

acuosas saturadas entre -2,1 y 32 °C (28 y 89,6 °F) o mojando la ceniza de sosa con una cantidad calculada de agua en este rango de temperatura. [46]

El análisis por MEB de las sales obtenidas a 32 °C mostraron una morfología difusa de cristales semiamorfos en las áreas estudiadas, con una ligera formación ortorrómbica del cristal (Figura 56: 1, 2 y 3). Igualmente se observó una estructura en forma de ramificaciones en combinación con los cristales; la formación ortorrómbica se ve impedido por la presencia de agua de cristalización. En comparación con los cristales obtenidos a 30°C, éstos presentaron mayor deformación debido al aumento de las moléculas de agua de cristalización en el carbonato, como muestran los análisis por DRX. En la Figura 56 se puede observar los resultados por MEB.

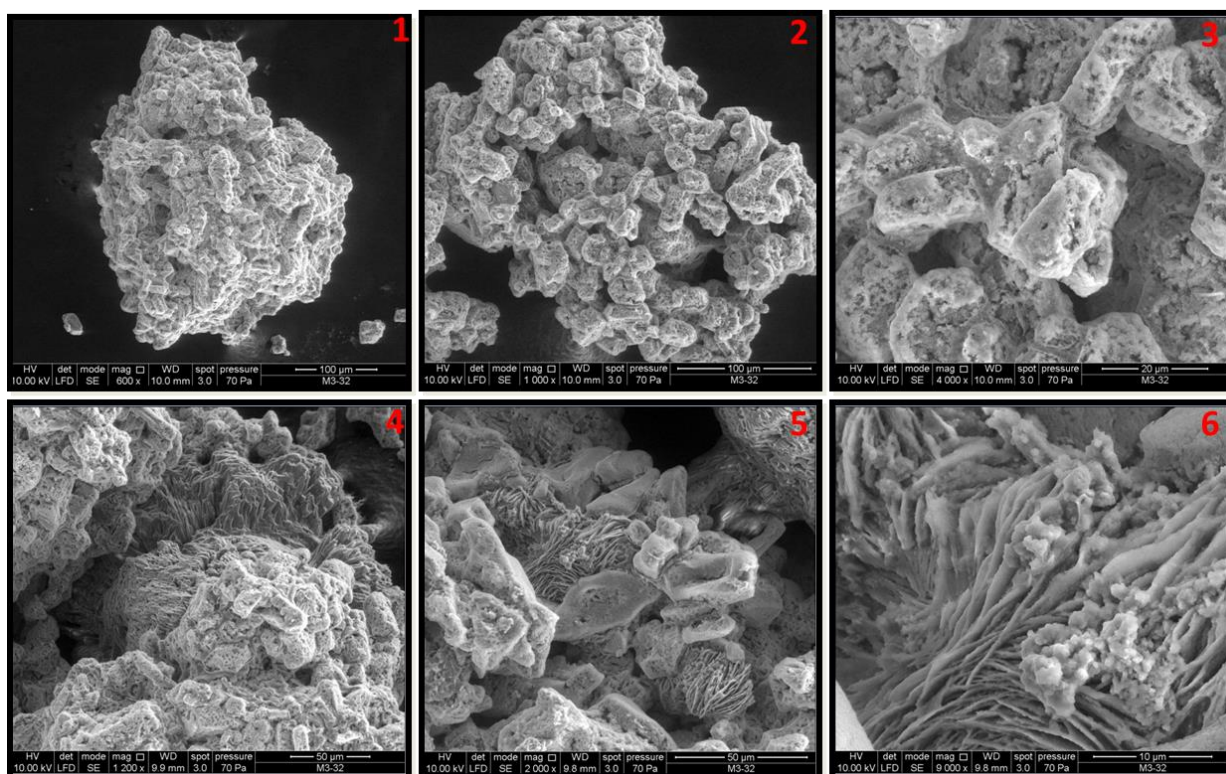


Figura 56. MEB de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ obtenidas a 32°C

Por medio del análisis EDS de rayos X se caracterizó la muestra, obteniendo sodio, oxígeno y carbono como elementos principales del cristal a través del espectro que se presenta en la Figura 57, y sus respectivas concentraciones se muestran en la Tabla 9.

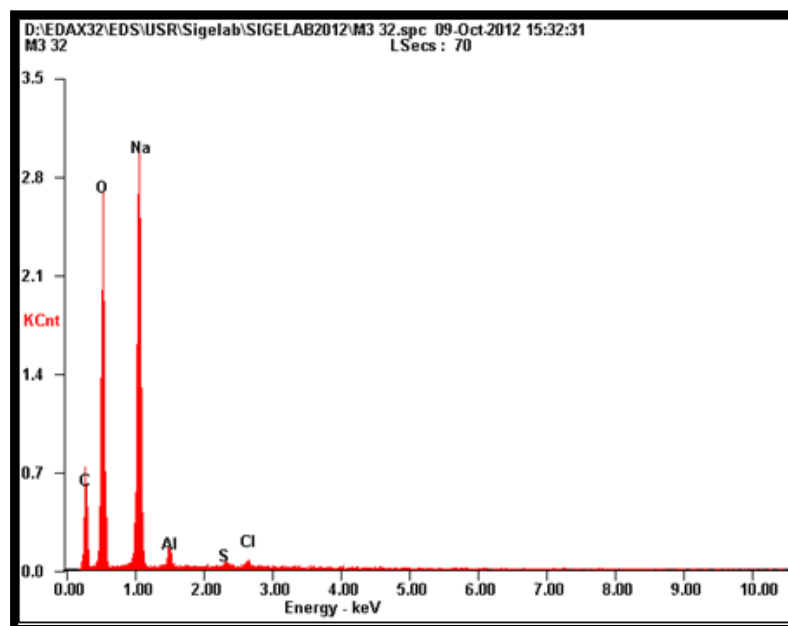


Figura 57. Análisis EDS de rayos X de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a 32 °C

Tabla 9. Porcentajes de elementos identificados en la muestra de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a 32 °C

Elemento	Wt%	At%
C	18,83	27,41
O	35,60	38,89
Na	40,26	30,61
Al	02,71	01,75
S	01,04	00,57
Cl	01,56	00,77

Entre los 32 y 80°C se obtuvo en mayor porcentaje la forma monohidratada del carbonato de sodio conforme se produjo el aumento de la temperatura. Los porcentajes

de carbonato y agua de cristalización son los mismos que en el resultado anterior a una temperatura de 30 °C. En la Figura 58 se observan los difractogramas obtenidos por DRX.

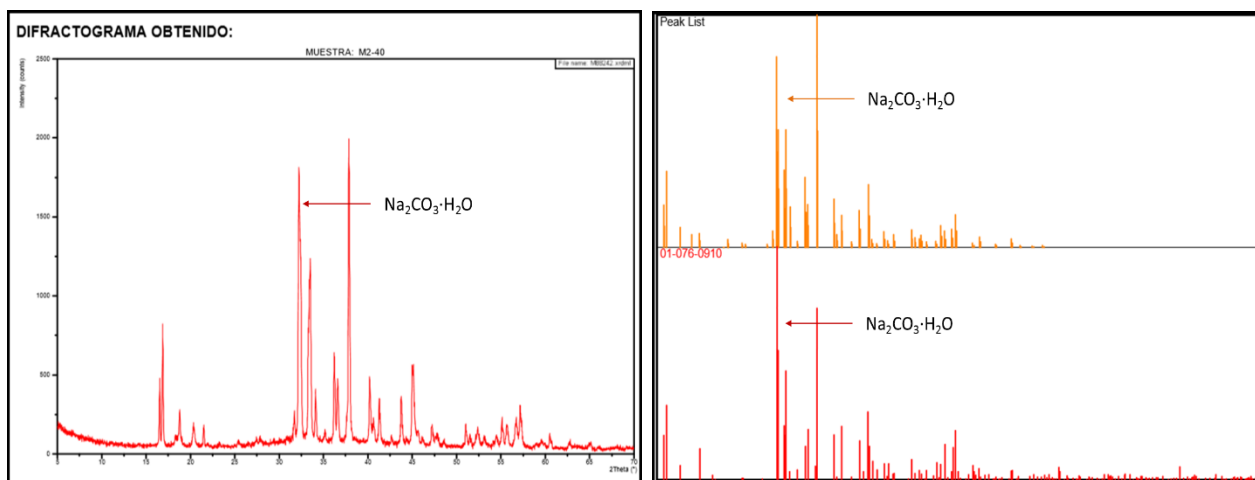


Figura 58. Resultados de DRX de sales obtenidas de la evaporación en horno a 40 °C

Por MEB se pudo obtener a 40 °C desaparición de la estructura amorfa y más definición en la forma del cristal, debido a la menor cantidad de moléculas de agua como se puede observar en la Figura 59.



Figura 59. MEB de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ obtenidas a 40 °C

A 100 °C se obtuvo la forma anhidra del carbonato de sodio a consecuencia de la alta temperatura de trabajo y evaporación del agua contenida en la muestra de licor cáustico. En la Figura 60 se observa los resultados de DRX.

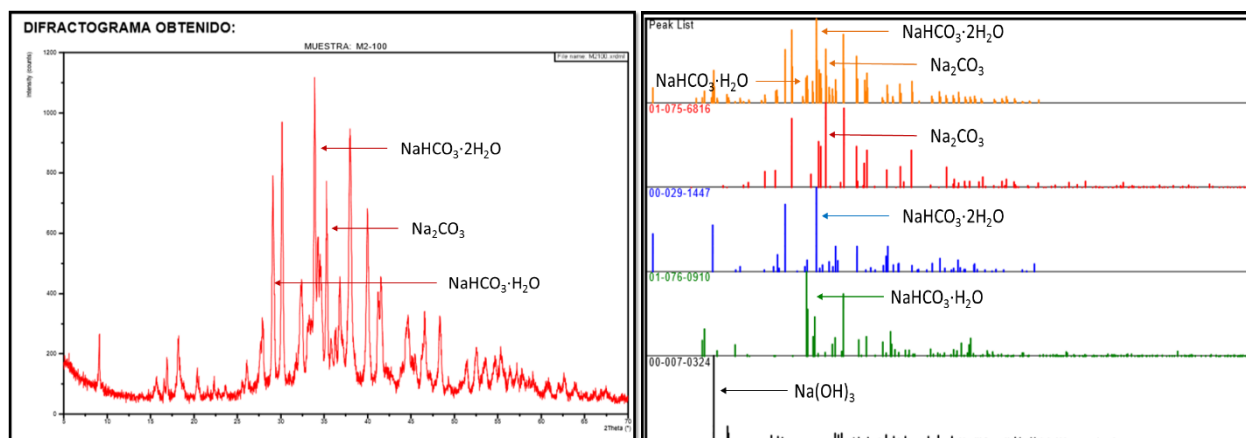


Figura 60. Resultados de DRX de sales obtenidas de la evaporación en horno a 100°C

El hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) reportado en los análisis de DRX se debe a que el recipiente empleado en la evaporación fue fabricado en material de aluminio, el cual reaccionó con el licor cáustico y ocurrió un proceso de corrosión, generando que parte de éste se mezclara con los cristales de carbonato contaminando la muestra.

En la Figura 61 se presenta el diagrama de fases del carbonato de sodio y se ubicó en el mismo los hábitos cristalinos según el porcentaje de Na_2CO_3 obtenido de la evaporación de 2 mL de muestra de licor cáustico a una temperatura determinada. Este diagrama ayuda a rastrear los efectos de enfriamiento, calentamiento y el cambio de las concentraciones. Por ejemplo, en el ensayo 9, a 29% de Na_2CO_3 la solución está insaturada a todas las temperaturas por encima de 31 °C (304 ° F), que es donde el 29% de concentración cruza la curva de saturación. Por debajo de esta temperatura, la fase sólida ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$) se comienza a formar, aumentando en cantidad con la caídas de la temperatura. Este cambio de fase hace que la concentración de la solución

saturada en contacto con los cristales disminuya, hasta que a $-2,1^{\circ}\text{C}$ ($28,2^{\circ}\text{F}$), la fase líquida desaparece dejando sólo una mezcla de sólido $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y hielo. ^[46]

Tabla 10. Diagrama de fases del carbonato de sodio

Área	% Na_2CO_3		Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			Fase sólida	Fase líquida % Na_2CO_3 en solución		Punto de transición	
	desde	hasta	Por debajo	desde	hasta		desde	hasta	% Na_2CO_3	$^{\circ}\text{C}$
A	0	5,8		0	-2,1	Hielo	0	5,8		
B	0	37,0	-2,1			Hielo + $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Ninguno		5,8	-2,1
C	5,8	37,0		-2,1	32,0	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	5,8	31,2		
D	37,0	45,7	32,0			$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ + $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Ninguno		31,2	32,0
E	31,2	45,7		32,0	35,4	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	31,2	33,2		
F	45,7	85,5	35,4			$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Ninguno		33,2	35,4
G	30,8	85,5		35,4	109,0	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	33,2	30,8		
H	85,5	100,0	109,0			$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ + Na_2CO_3	Ninguno		30,8	109,0
I	30,8	100,0		109 y por encima		Na_2CO_3	30,8			

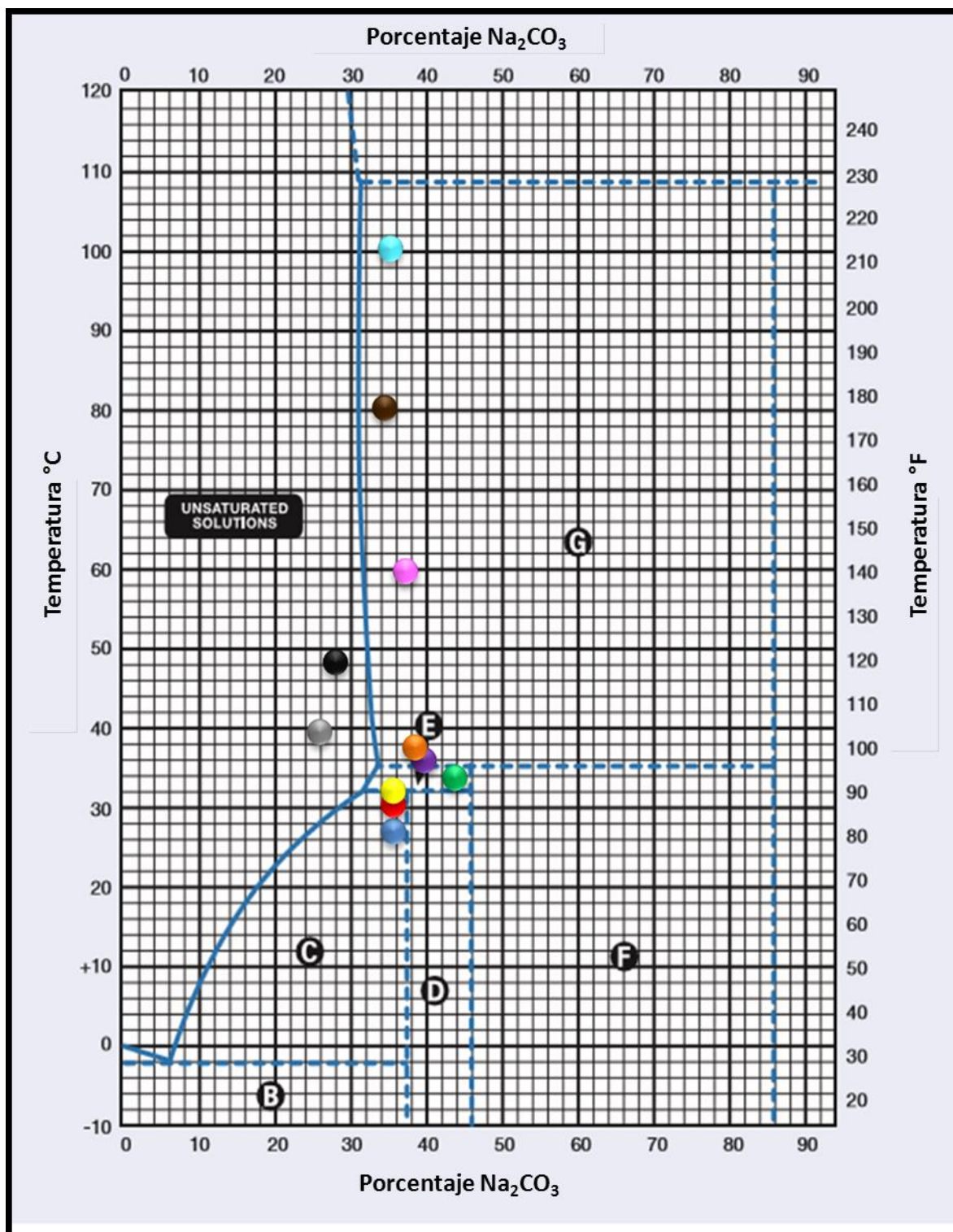


Figura 61. Diagrama de fases del carbonato de sodio

6.5 Determinación de las áreas y volumen de la laguna

Se empleó las ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8 para la determinación teórica de las áreas y volumen de la laguna, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Determinación de las áreas y volumen de la laguna

Área ₁ (cm ²)	Área ₂ (cm ²)	Volumen teórico de la laguna (cm ³)	Volumen experimental de la laguna (cm ³)
272	2585	5292	7000

Los resultados teóricos estuvieron por debajo a los obtenidos experimentalmente, principalmente porque que no se contempló el embudo empleado para la recirculación del licor cáustico en el sistema, el cual fue empleado para llevar el líquido desde las lagunas hasta el tanque reservorio y luego hacia el aspersor por medio de las bombas peristálticas.

La bandeja fue dividida por zonas, como se observa en la Figura 16, y cada una presentó un volumen de retención de licor cáustico diferente medido hasta el tope de la barra de acero inoxidable que se diseñó con 2 cm de altura. La zona 1 presentó un volumen de 1280 mL, zona 2: 720 mL y zona 3: 1610 mL, dando un volumen total de 3610 mL, el cual fue la cantidad de licor cáustico que se retuvo en la laguna y 890 mL restantes se mantuvieron en recirculación con la finalidad de incrementar el tiempo de incidencia de las variables meteorológicas simuladas sobre la superficie del líquido.

6.5.1 Determinación de la capacidad de la laguna de evaporación a escala real

La laguna a escala experimental presenta un volumen en evaporación de $3.610 \text{ cm}^3 = 0,00361 \text{ m}^3$ (volumen a la medida de las barras de acero inoxidable en el interior de la misma) y una capacidad total de $7000 \text{ cm}^3 = 0,007 \text{ m}^3$. Considerando que el caudal real del licor cáustico en la producción de alúmina es de $180 \text{ m}^3/\text{h}$, éste se relaciona con la capacidad total de la laguna experimental obteniendo el resultado que se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Escala volumétrica aproximada de la laguna de evaporación de licor cáustico

Escala volumétrica de la laguna
1:25714

A partir del volumen de evaporación experimental y la escala volumétrica de la laguna real, se obtuvo un volumen de licor cáustico que estará en evaporación de 94 m^3 y 86 m^3 se mantendrán en recirculación dentro del tanque.

6.6 Medición del caudal de los aspersores

En la medición del caudal de los dos aspersores empleados se utilizó la ecuación 4.0, midiendo el volumen de licor cáustico con un cilindro graduado en un tiempo determinado, obteniendo un caudal total de $120 \text{ mL}/\text{min}$. Se empleó una bomba peristáltica para cada aspersor configurada a un caudal de $100 \text{ mL}/\text{min}$, sin embargo, experimentalmente estos valores no coincidieron ya que en el aspersor disminuye el diámetro de salida que recorre el licor, aumentando la presión en el sistema y provocando que el caudal sea menor.

Al iniciarse el proceso de evaporación, como se mostrará en los apartados siguientes, el caudal se mantuvo al máximo ya que la densidad del licor cáustico fue muy cercana a la del agua. Al llevarse a cabo la evaporación el caudal disminuyó, debido a que aumentó la densidad del líquido y por consiguiente se vio impedido el recorrido del mismo en la salida del aspersor, provocando un aumento de presión en el sistema y por consiguiente una disminución de la tasa de evaporación al finalizar dicho proceso.

6.7 Evaluación de la capacidad de evaporación del sistema modelado

En cada uno de los experimentos realizados se estudió las tasas de evaporación teóricas (Dalton y Penman) y experimentales, además se evaluó como los factores de simulación de variables meteorológicas (viento y radiación) influyen en los resultados obtenidos, tras el monitoreo cada dos horas del volumen de recolección, humedad y temperatura del ambiente del laboratorio e índice de refracción de 4500 mL de una muestra de licor cáustico de las lagunas 2 y 3 ubicadas en Cambalache - Estado Bolívar. Finalmente, se recolectó las sales obtenidas para su caracterización.

6.7.1 Experimento 1. Medición de la evaporación sin viento y sin radiación

En las Figuras 62 y 63 se observan las tasas de evaporación teórica y experimental del licor cáustico procedente de la laguna 2 para un sistema sin viento y sin radiación, cuyos datos serán tomados como referencia para la estimación de la variación bajo las condiciones meteorológicas simuladas (Ver tabla de datos en Apéndice 1).

Se observa como la temperatura es inversamente proporcional a la humedad relativa, siendo ésta la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que existe en la atmósfera y la máxima que podría contener a idéntica temperatura, ^[46] por lo tanto, al aumentar ésta última, se incrementa la presión de saturación haciendo que la humedad relativa disminuya al ser inversamente proporcionales. Los picos observados

corresponden a la hora del día a la que fue tomada cada una de las medidas; en horas de la mañana se presentó menor temperatura y por lo tanto mayor humedad relativa, lo que fue variando al pasar las horas. Éste comportamiento igualmente se observó en los experimentos 2 y 3.

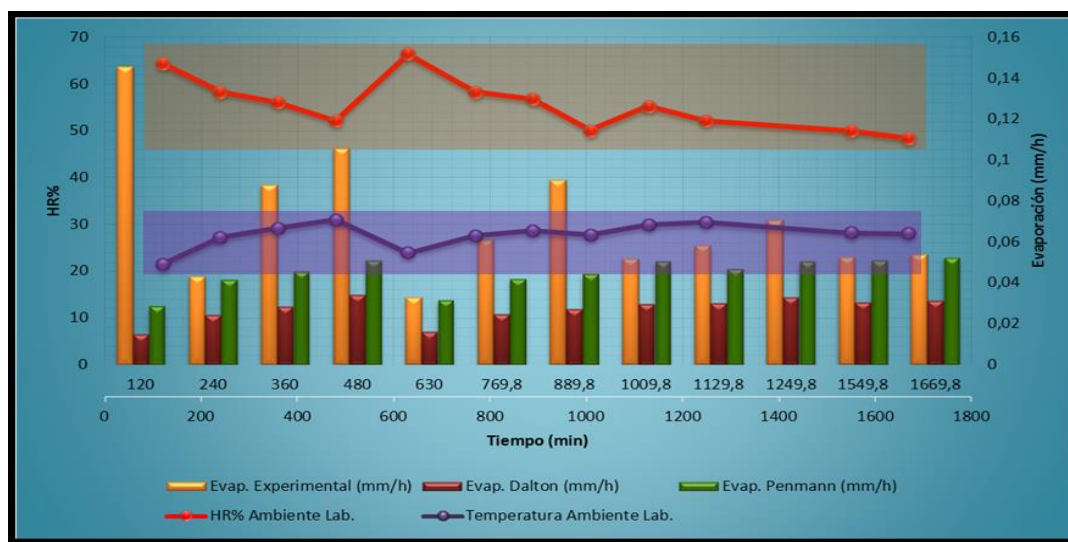


Figura 62. Tasas de evaporación sin viento y sin radiación. Ensayo 1

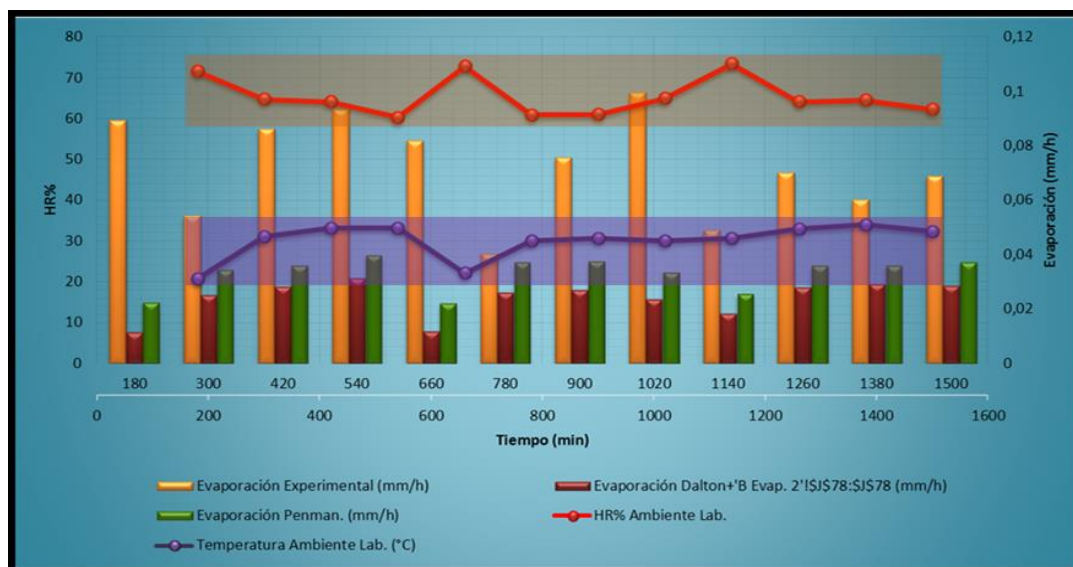


Figura 63. Tasas de evaporación sin viento y sin radiación. Ensayo 2

A partir de los resultados obtenidos se tomaron los máximos y mínimos de las tasas de evaporación teórica y experimental como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Máximos y mínimos de los resultados teóricos y experimentales de los ensayos 1 y 2 para el experimento 1: sin viento y sin radiación

Tasas de Evaporación (mm/h)						
Ensayo	Evap. Experimental		Evap. Dalton		Evap. Penman	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
1	0,146	0,033	0,034	0,015	0,052	0,029
2	0,099	0,040	0,031	0,011	0,040	0,022
Tasas de Evaporación (m ³ /hectárea·día)						
Ensayo	Evap. Experimental		Evap. Dalton		Evap. Penman	
1	1,460	0,330	0,340	0,150	0,520	0,290
2	0,990	0,400	0,310	0,110	0,400	0,220

Se obtuvo una variación de las tasas de evaporación conforme se llevó a cabo el proceso, aunado principalmente a las pérdidas por aspersion generadas por el impacto entre el licor dispersado y el panel de evaporación, lo que a su vez causó una diferencia significativa entre los resultados experimentales y teóricos dado que éstos últimos no contemplan las pérdidas ocurridas durante el tiempo transcurrido.

La evaporación gradual del agua contenida en el licor cáustico provocó que la concentración de carbonatos aumentara y ésta fue observada gráficamente en relación a la variación del índice de refracción de una muestra de carbonato de sodio pura (Na_2CO_3) (Figura 64). Al aumentar la concentración, el licor se hizo más denso, por lo que se dificultó la aspersion al disminuir la transformación de la energía total en energía cinética, siendo ésta requerida para llevar al líquido al tamaño de partícula deseada. Es por esta razón que se obtuvo una mayor tasa de evaporación al iniciarse el procedimiento, ya que al haber mayor aspersion aumenta el área superficial de recubrimiento en el panel y la mayor formación de partículas aceleraron el proceso de

evaporación en comparación a los resultados finales. Ésta última tendencia también pudo apreciarse en los experimento 2 y 3. (Ver tabla de datos en Apéndice 2).

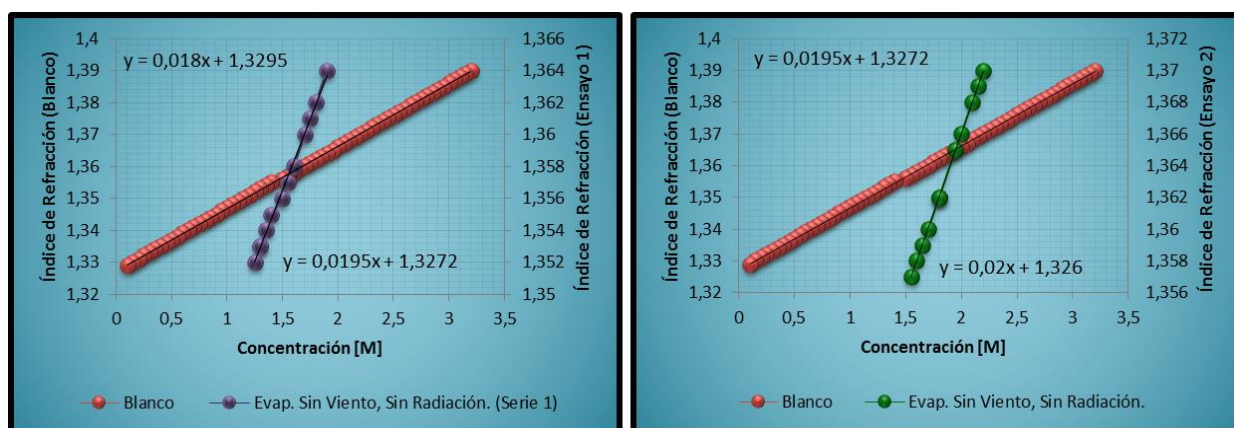


Figura 64. Concentración del licor cáustico del experimento 1. Ensayo 1 y 2

6.7.2 Experimento 2. Medición de la evaporación con viento y sin radiación

Con la finalidad de poder simular experimentalmente condiciones meteorológicas de un día sin incidencia de radiación solar y sólo con viento (día nublado o noches), se procedió a emplear un ventilador con una velocidad regulada a 0,5 km/h, es decir, una velocidad de viento menor con respecto a las condiciones reales registradas en promedio en Puerto Ordaz, Edo. Bolívar.

La razón por la cual se disminuyó la velocidad del viento fue para evitar las pérdidas por arrastre que éste genera y contemplar principalmente la evaporación producida por el sistema. La medición del viento realizada se muestra en la Figura 65.

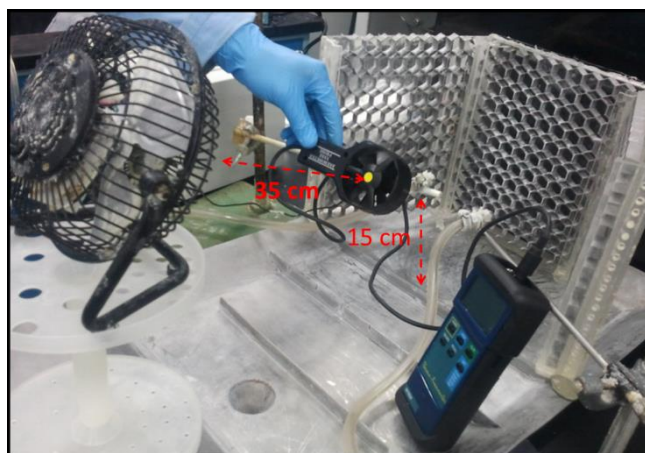


Figura 65. Medición de la velocidad del viento

En las Figuras 66, 67 y 68 se observan las tasas de evaporación del licor cáustico procedente de la laguna 2, generadas en el procedimiento experimental con viento y sin radiación (Ver tabla de datos en Apéndice 3).

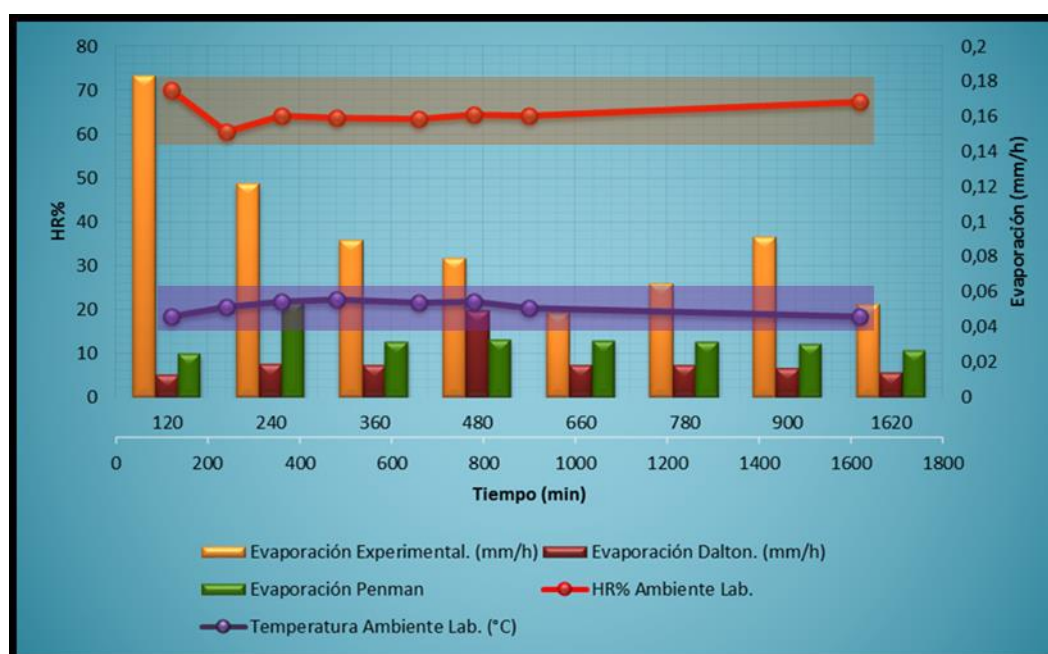


Figura 66. Tasas de evaporación con viento y sin radiación. Ensayo 1

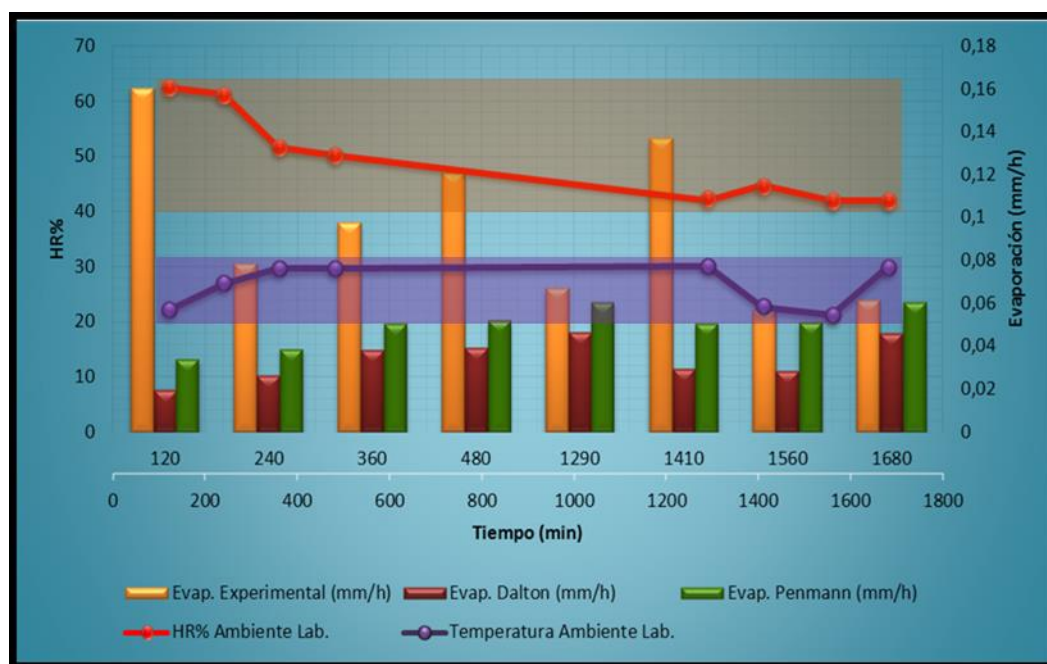


Figura 67. Tasas de evaporación con viento y sin radiación. Ensayo 2

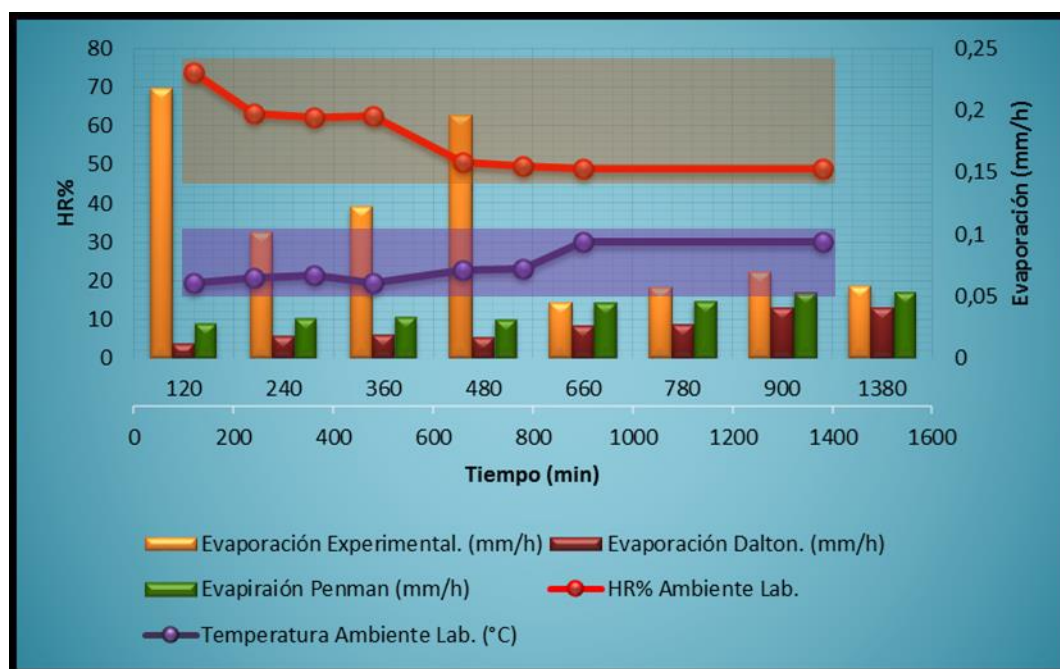


Figura 68. Tasas de evaporación con viento y sin radiación. Ensayo 3

En la Tabla 14 se observan los datos teóricos y experimentales que permiten la comparación de los resultados con el experimento 1.

Tabla 14. Máximo y mínimo de los resultados teóricos y experimentales de los ensayos 1, 2 y 3 para el experimento 2. Con viento y sin radiación

Tasas de evaporación (mm/h)						
Ensayo	Evap. Experimental		Evap. Dalton		Evap. Penman	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
1	0,183	0,048	0,049	0,012	0,054	0,025
2	0,160	0,057	0,046	0,019	0,061	0,034
3	0,196	0,045	0,041	0,012	0,053	0,028
Tasas de Evaporación (m ³ /hectárea·día)						
Ensayo	Evap. Experimental		Evap. Dalton		Evap. Penman	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
1	1,830	0,480	0,490	0,120	0,540	0,250
2	1,600	0,570	0,460	0,190	0,610	0,340
3	1,960	0,450	0,410	0,120	0,530	0,228

Se obtuvo un aumento de la evaporación experimental con respecto al experimento anterior, sin embargo, teóricamente los resultados fueron muy aproximados debido a que en las ecuaciones de Dalton y Penman (Ec. 1.0 y Ec. 1.6) la variable que altera las tasas de evaporación es la velocidad del viento, la cual fue trabajada muy por debajo a los datos reales registrados en Puerto Ordaz, Edo. Bolívar.

El resultado obtenido se debe principalmente a que ocurren pérdidas por arrastre a consecuencia del viento, dichas perdidas se traducen en el incremento de la evaporación del líquido conforme disminuye el tamaño de la gota, aumenta la velocidad y la temperatura. ^[47] Aunado a esto, el viento proporcionado mantuvo una renovación constante de las capas de aire saturadas de vapor de agua acelerando el proceso. Ésta tendencia igualmente fue observada en el experimento 3.

Por medio del monitoreo cada dos horas se pudo obtener gráficamente, como se muestra en la Figura 69, la variación de la concentración de carbonato de sodio en el proceso, obteniendo un aumento de la misma a medida que se llevó a cabo la evaporación, evaluada a través de una muestra de carbonato de sodio pura empleada como blanco. (Ver tabla de datos en Apéndice 4).

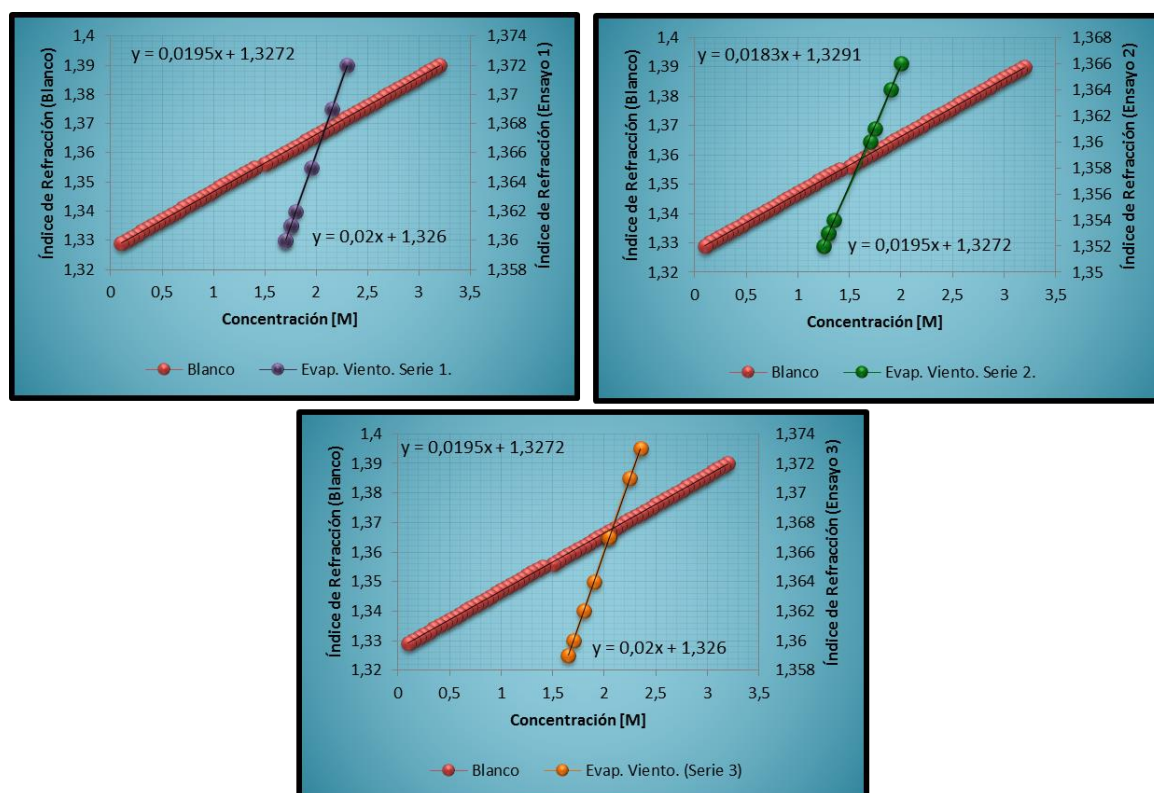


Figura 69. Concentración del licor cáustico del experimento 2. Ensayo 1, 2 y 3

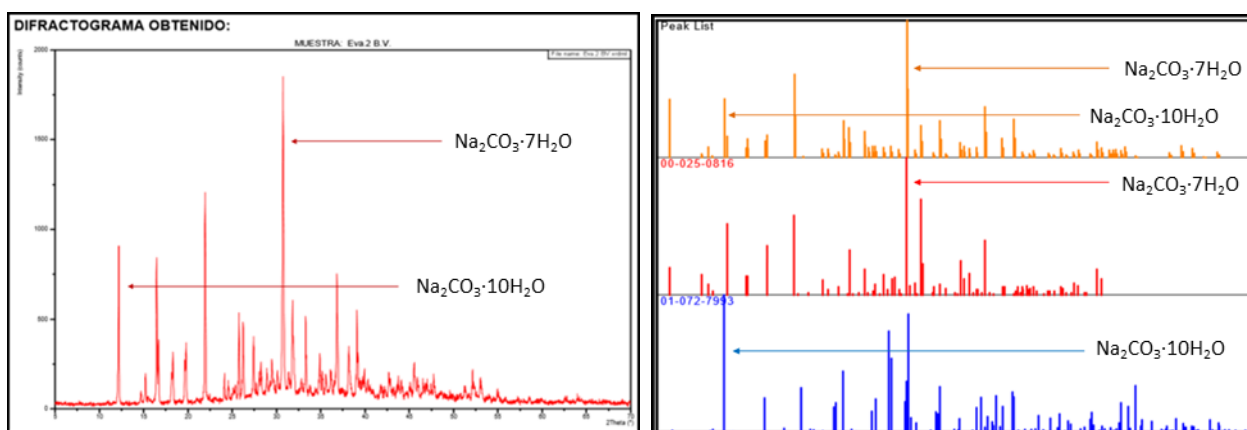
De cada uno de los ensayos se recolectó las sales producto de la evaporación obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Cristales recolectados del proceso de evaporación del experimento 2

Ensayo	Sales del Panel (g $\pm$ 0,01)	Sales de la bandeja (g $\pm$ 0,01)	Total de sales recolectadas (g $\pm$ 0,01)	%p/v
1	119,47	393,96	513,43	11,41
2	176,37	336,79	513,16	11,40
3	133,98	396,99	530,97	11,80

Como se puede observar el licor cáustico procedente de la laguna 2 presentó alrededor de 11,5% de sales en 4500 mL de muestras. Sin embargo, ocurrieron pérdidas por arrastre en los resultados experimentales que fueron contemplados para un mayor ajuste respecto a los resultados teóricos calculados por la ecuación de Dalton y Penman. En base a lo anterior se obtuvo alrededor de un 4% de sales que no pudieron ser recolectadas al finalizar el procedimiento.

Del ensayo 2, se recolectaron las sales tanto del panel como de la laguna y fueron analizadas y caracterizadas por DRX como se muestra en las Figuras 70 y 71.

**Figura 70.** Análisis de DRX de sales recolectadas de la laguna para un sistema sólo con viento

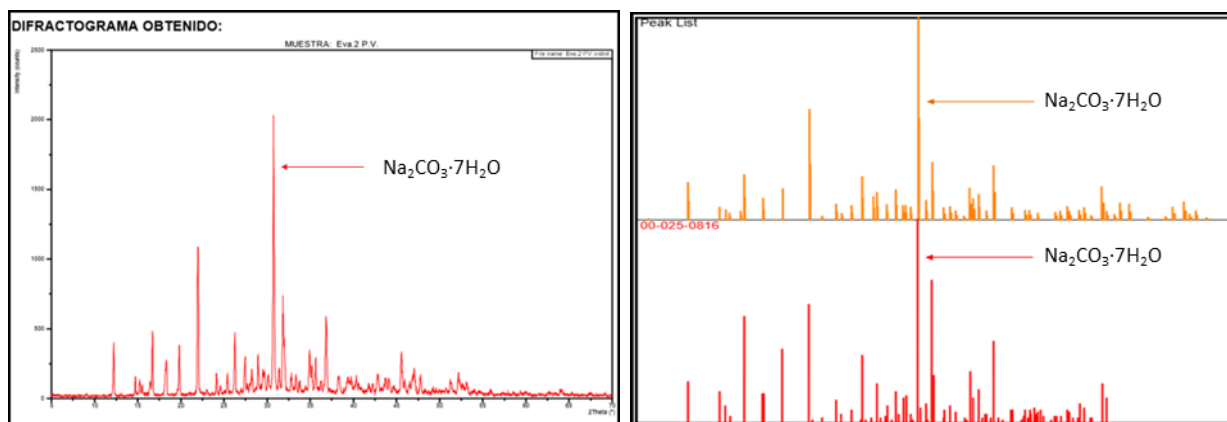


Figura 71. Análisis de DRX de sales recolectadas del panel para un sistema sólo con viento

Como se puede observar se obtuvo carbonato de sodio heptahidratado tanto en el panel de evaporación como en la laguna, coincidiendo los picos de la muestras en el difractograma con los dados por la base de datos. Este hábito cristalino se debe a la humedad y la temperatura, siendo las condiciones mínimas 21,2°C y las máximas 30,1°C.

En la Figura 72 se observa la cristalización de las sales sobre el panel y la laguna de evaporación.

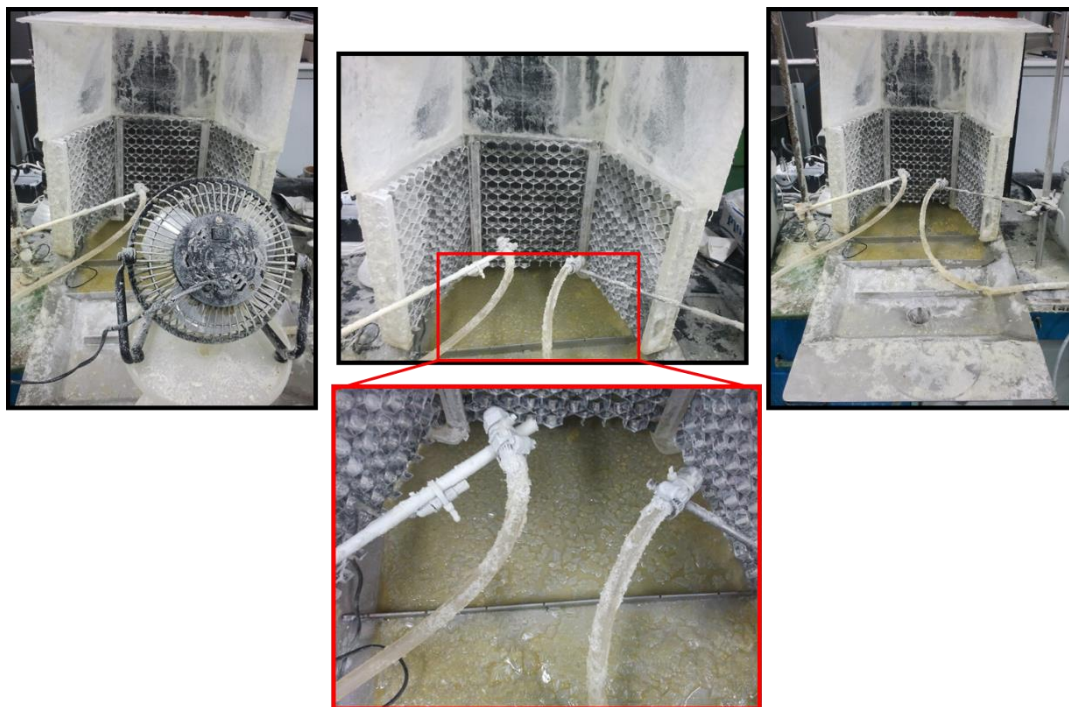


Figura 72. Sales producto de la evaporación del experimento 2

Para el estudio de la morfología de las sales obtenidas de la laguna se realizó MEB (Figura 73), donde se observó una estructura cristalina amorfa del carbonato de sodio debido al alto porcentaje de agua de cristalización, sin embargo se obtienen pequeños cristales de tipo ortorrómbico como se muestra en las imágenes 3, 8 y 9. El cambio en la morfología se debe a la presencia de distintos hábitos cristalinos, donde la variación de las formas hidratadas favorece en mayor o menor medida la obtención de un cristal más definido.

El estudio por DRX de las sales obtenidas del panel de evaporación del experimento 2 – como ya se mencionó – dieron como resultado $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ al igual que en el experimento 3 como se presentará a continuación, es por ello que esta muestra se analizará por MEB en el apartado siguiente.

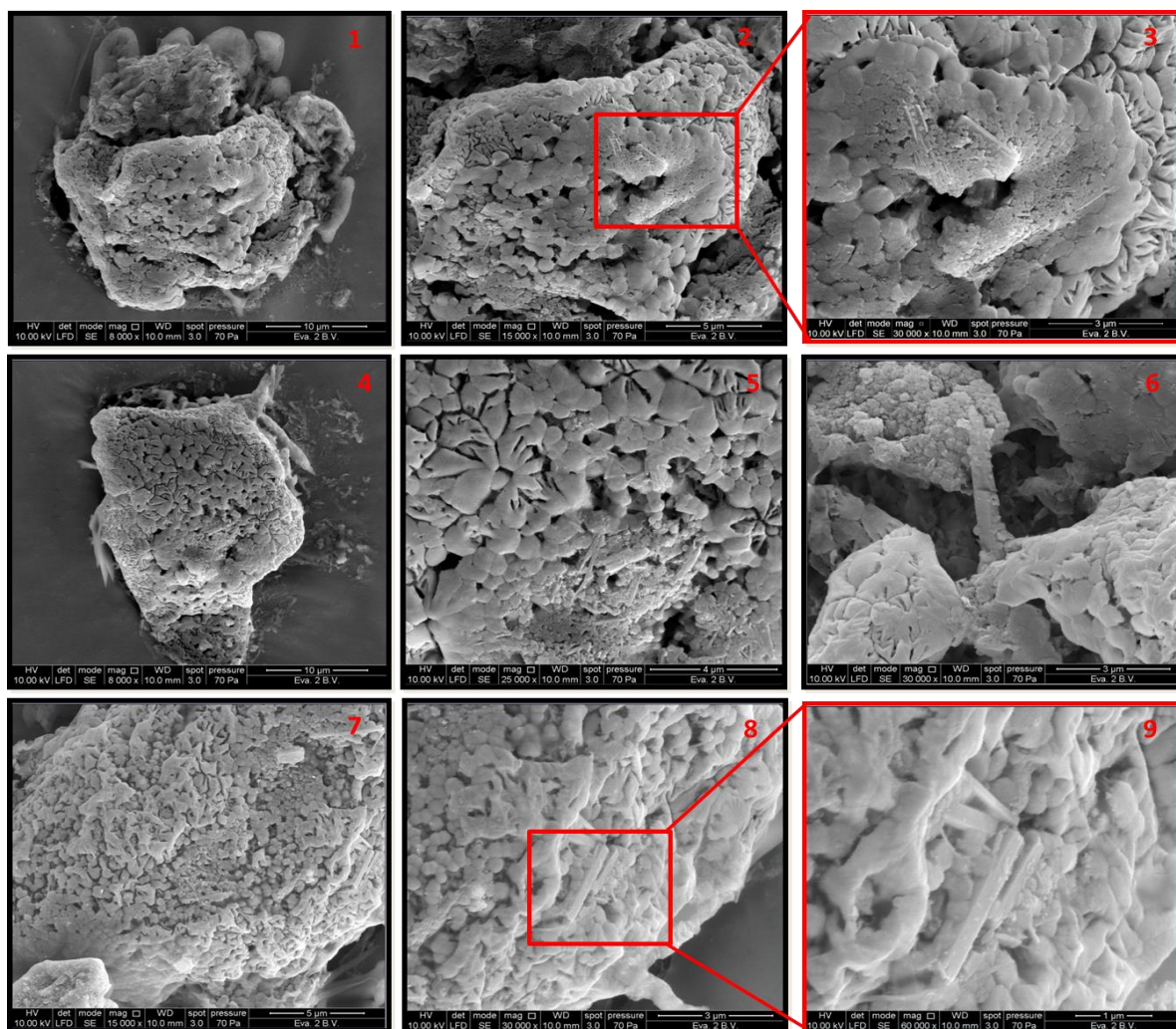


Figura 73. MEB de sales obtenidas de la laguna del experimento 2

6.7.3 Experimento 3. Medición de la evaporación con viento y radiación

Para la simulación meteorológica de un día con viento y radiación solar, (condiciones ideales que favorecen la evaporación natural) se procedió a emplear un ventilador con velocidad regulada a 0,5 Km/h (Ver experimento 2) y una lámpara a $15,3055 \text{ W/m}^2$, dato aproximado al promedio de radiación solar de Puerto Ordaz, Edo. Bolívar, para

evaporar 4500 mL de licor cáustico procedente de las lagunas 2 y 3. En la Figura 74 se observa la metodología empleada para la medición de la radiación.

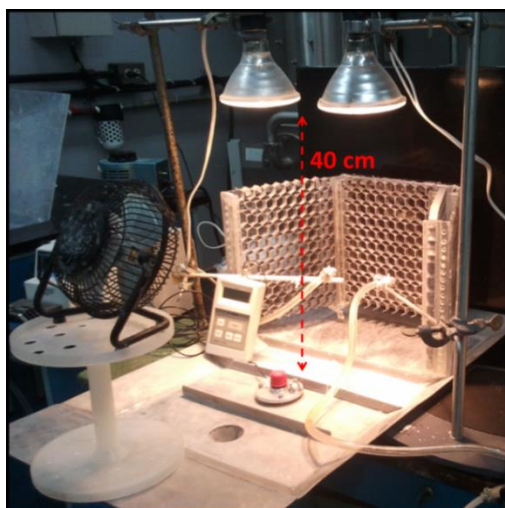


Figura 74. Medición de la Radiación

En las Figuras 75, 76 y 77 se observan las tasas de evaporación obtenidas. (Ver tabla de datos en Apéndice 5)

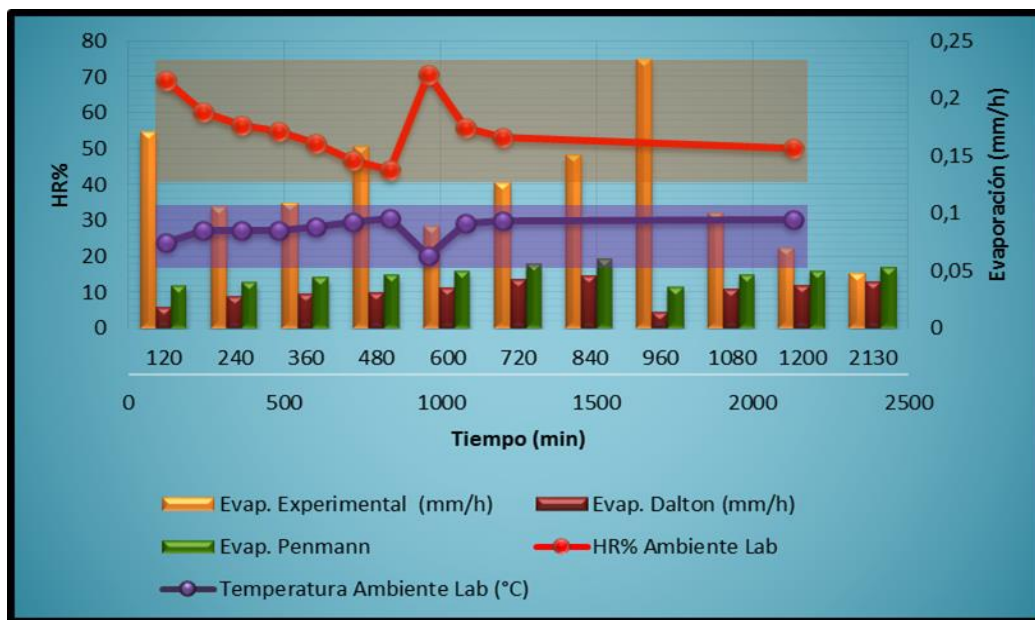


Figura 75. Tasas de evaporación con viento y radiación. Laguna 3. Ensayo 1

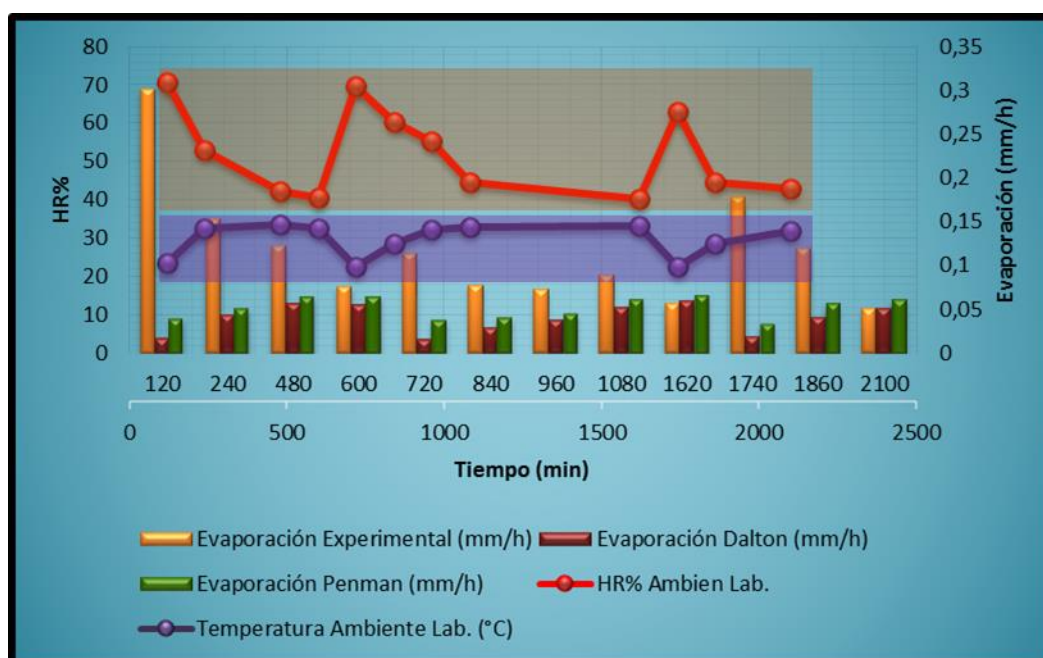


Figura 76. Tasas de evaporación con viento y radiación. Laguna 3. Ensayo 2

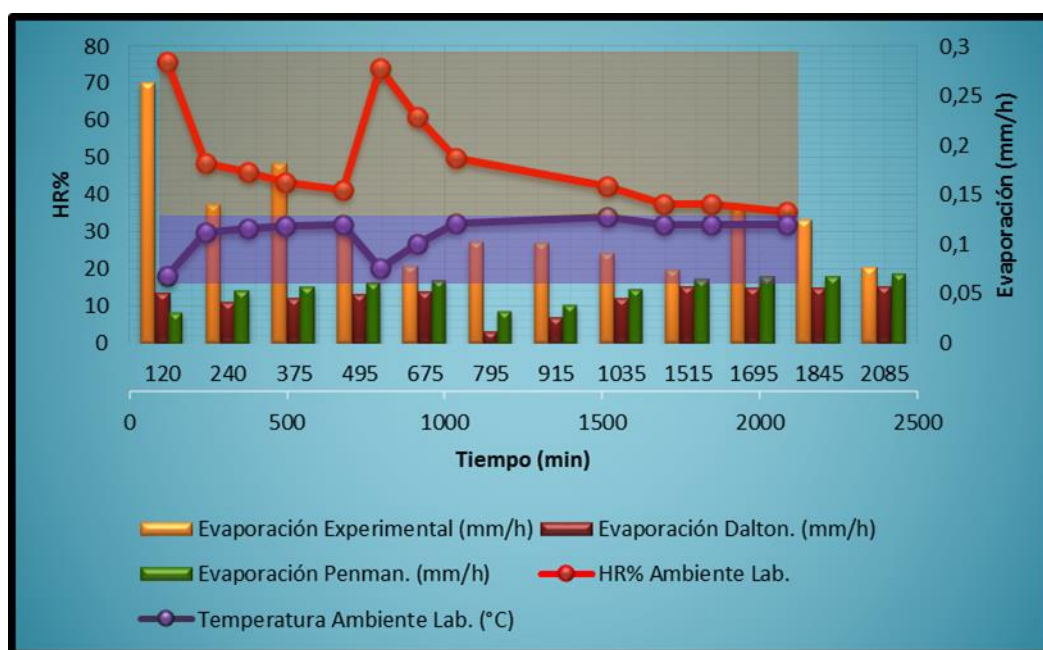


Figura 77. Tasas de evaporación con viento y radiación. Laguna 2. Ensayo 3

Con los datos reportados gráficamente se tomaron los máximos y mínimos del proceso de evaporación de cada uno de los ensayos realizados para poder analizarlos respecto a los experimentos 1 y 2. (Tabla 16).

Tabla 16. Máximo y mínimo de los resultados teóricos y experimentales de los ensayos 1, 2 y 3 para el experimento 3. Con viento y radiación

Tasas de evaporación (mm/h)						
Ensayo	Evap. Experimental		Evap. Dalton		Evap. Penman	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
1	0,234	0,047	0,046	0,013	0,059	0,035
2	0,302	0,057	0,059	0,016	0,066	0,038
3	0,263	0,074	0,057	0,050	0,070	0,030
Tasas de Evaporación (m ³ /hectárea·día)						
Ensayo	Evap. Experimental		Evap. Dalton		Evap. Penman	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
1	2,340	0,470	0,460	0,130	0,590	0,350
2	3,020	0,570	0,590	0,160	0,660	0,380
3	2,630	0,740	0,570	0,500	0,700	0,300

Como se pudo observar en la simulación de variables meteorológicas de viento y radiación aumentaron las tasas de evaporación experimental con respecto al experimento 1 y 2. En éste caso, la incidencia de radiación provocó un aumento de la temperatura que incrementó la energía cinética de las moléculas de licor cáustico esparcidas sobre el panel, acelerando el proceso de evaporación al alcanzar con mayor facilidad la energía requerida para pasar a la fase vapor.

La aspersión sobre el panel provocó un aumento de la evaporación al crearse una película más delgada del líquido sobre todo el área superficial, al ser las láminas más delgadas se adquiere mayor energía térmica proporcionada por la radiación aumentando su temperatura, lo cual aumenta consecuentemente la energía cinética de

las moléculas haciendo que superen la energía de atracción debida a las fuerzas intermoleculares, y en consecuencia, disminuye la tensión superficial incrementando el proceso de evaporación. Éste efecto del aumento del área superficial dado por los paneles, también se observó en los experimentos 1 y 2, sin embargo la tensión superficial fue mayor al no disponer de radiación.

Igualmente, el viento proporcionado reflejó su efecto en los resultados obteniendo, acelerando la evaporación del licor cáustico como se explicó en el experimento 2.

Al evaporarse la muestra de licor cáustico en estudio, se procedió a recolectar las sales obtenidas en la laguna y panel obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 17. Cristales recolectados del proceso de evaporación del experimento 3

Ensayo	Laguna	Sales del Panel (g $\pm$ 0,01)	Sales de la bandeja (g $\pm$ 0,01)	Total de sales recolectadas (g $\pm$ 0,01)	%p/v
1	3	629,60	741,54	1371,14	30,45
2	3	679,55	751,55	1431,10	31,80
3	2	152,98	454,99	607,97	13,51

La Tabla 17, muestra como la laguna 3 presentó mayor concentración de sales en solución con un promedio de 31% en comparación con la laguna 2, guardando aproximadamente una relación 1:2. Se observa que en este experimento ocurrieron perdidas mayores respecto al experimento 2, por efecto del viento y radiación que no permitieron la completa recolección de sales. Al ser las partículas del líquido más pequeñas, no se requiere de altas velocidades del viento para producir arrastre y se requiere de menor energía (dada por la radiación) para que ocurra el cambio de fase a vapor.

Contemplando las pérdidas generadas se obtiene aproximadamente un 20% de sales que no pudieron ser recolectadas respecto a los ensayos 1 y 2 (laguna 3) y un 10% en el ensayo 3 (laguna 2) .

Se tomaron las sales del ensayo 2 y se analizaron por DRX como se muestra en las figuras a continuación.

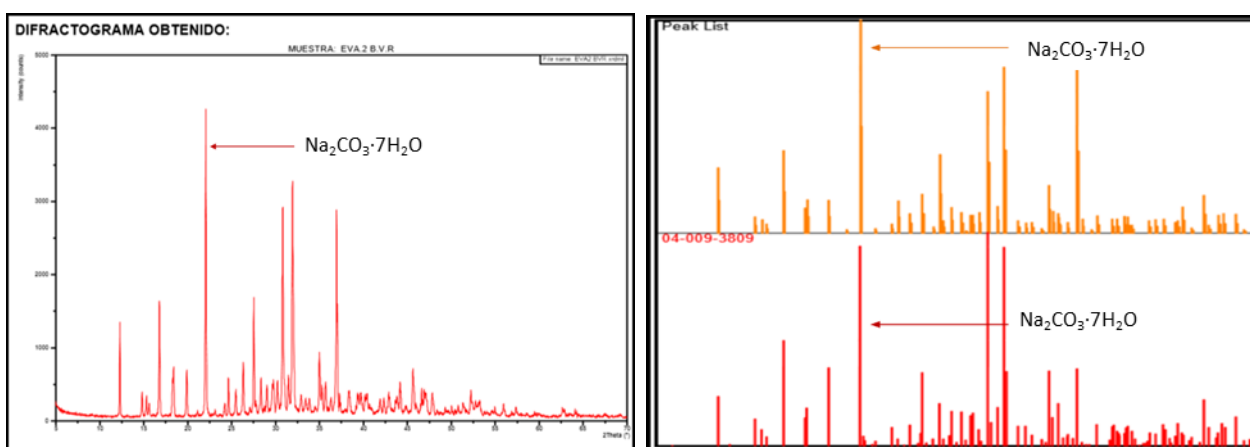


Figura 78. Análisis de DRX de sales recolectadas de la laguna para un sistema con viento y radiación

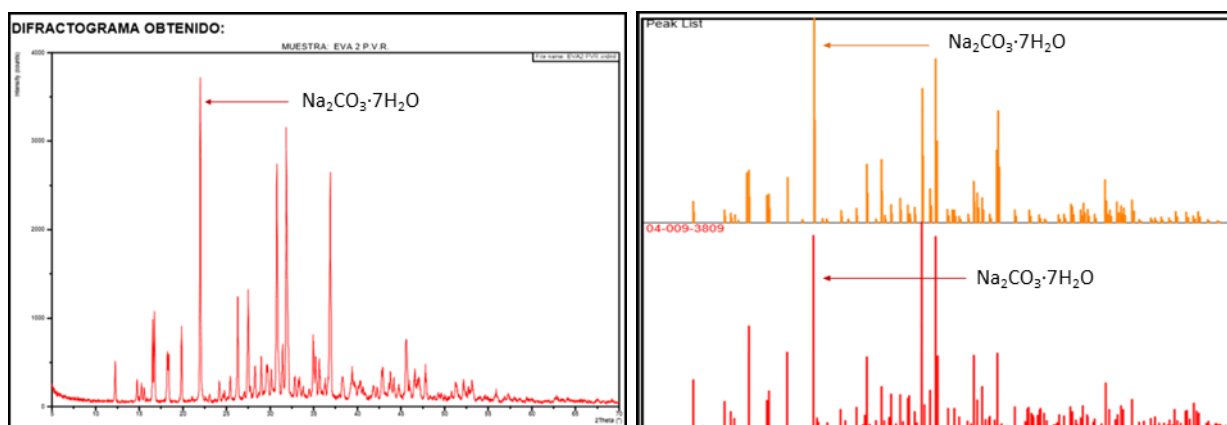


Figura 79. Análisis de DRX de sales recolectadas del panel para un sistema con viento y radiación

Al igual que en el experimento 2, sólo se obtuvo en ambos casos (laguna y panel) el carbonato de sodio heptahidratado dado a que las temperaturas no alcanzaron los niveles de energía necesarios para la obtención de cristales de menor hidratación, siendo las condiciones mínimas 20,7 °C y las máximas 33,9 °C.

En la Figura 80 se observa la cristalización de las sales de carbonato sobre el panel de evaporación obtenidas en el experimento 3.

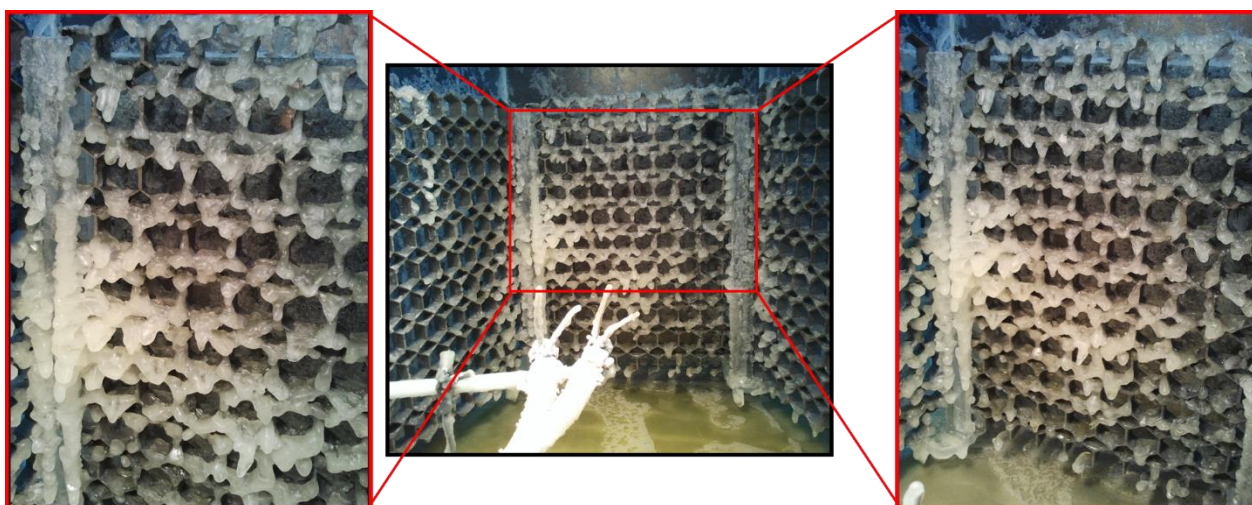


Figura 80. Sales producidas de la evaporación del experimento 1

La concentración de ambas lagunas pudo corroborarse con la medición del índice de refracción inicial que fue graficada como se muestra en la Figura 81, donde se comparó los resultados obtenidos con un blanco de carbonato de sodio puro, obteniéndose que la laguna 3 presentó mayor concentración que la laguna 2. Igualmente se observó un incremento progresivo y lineal de la concentración a medida que se llevó a cabo el proceso de evaporación del agua en cada uno de los ensayos realizados. (Ver tabla de datos en Apéndice 5).

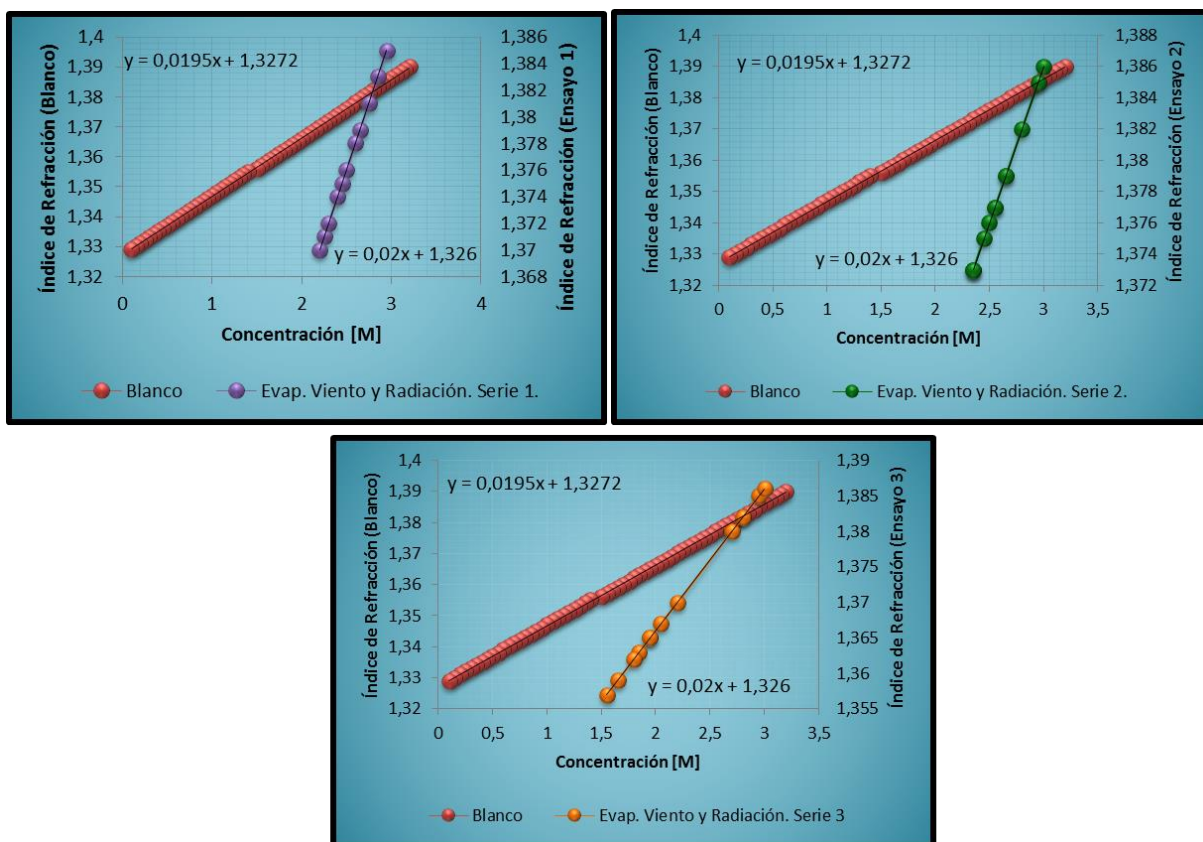


Figura 81. Concentración del licor cáustico del experimento 3. Ensayo 1, 2 y 3

Como ya se mencionó, las sales obtenidas de la laguna fueron identificadas por DRX como $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ al igual que en el experimento 2, es por esta razón que no se procedió a realizar el análisis por MEB.

Las sales recolectadas del panel fueron analizadas por MEB como se muestra en la Figura 82 a continuación.

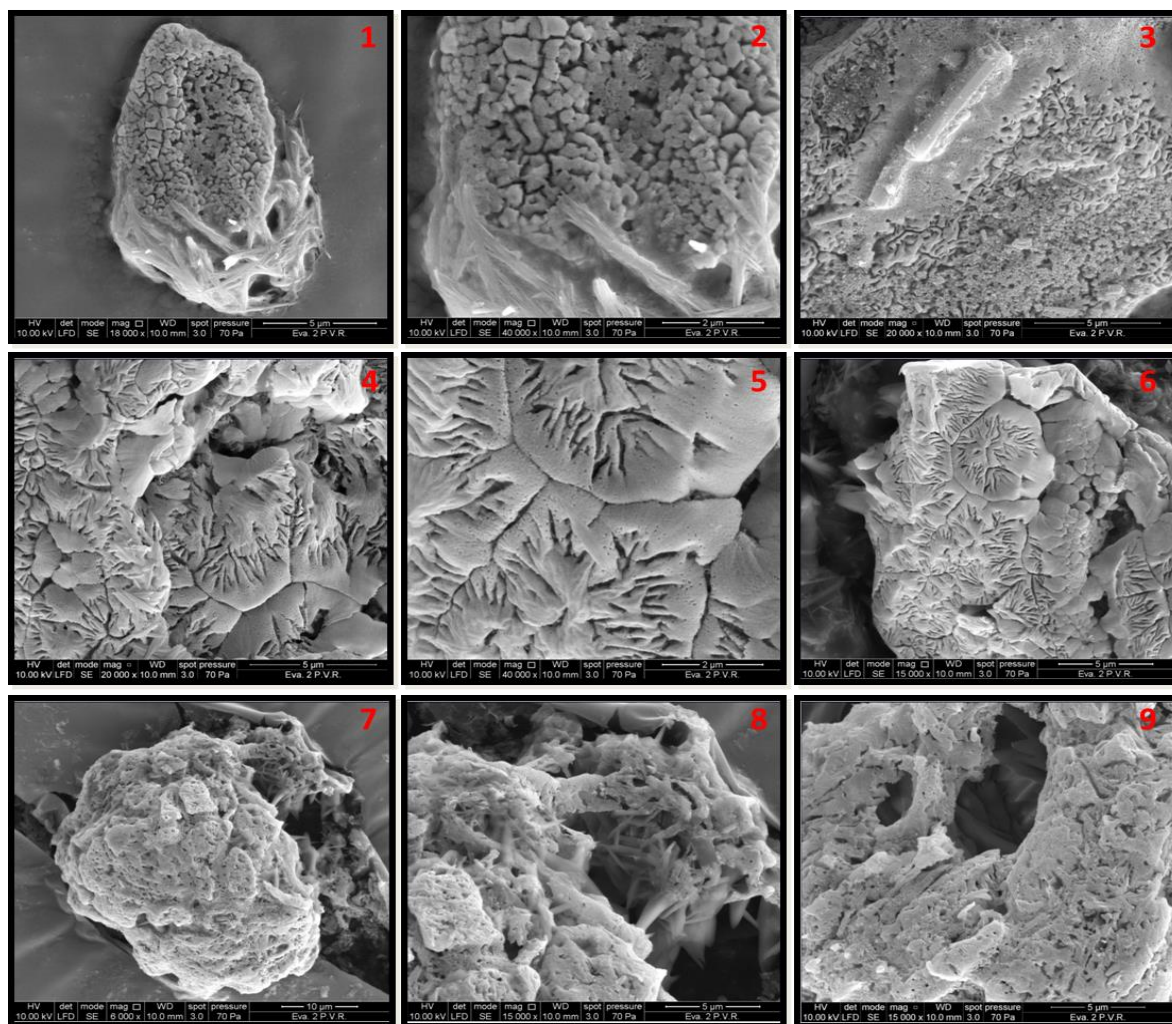


Figura 82. MEB de sales obtenidas del panel de evaporación del experimento 3

La morfología obtenida de las sales recolectadas del panel presentó una estructura amorfa a consecuencia del agua de cristalización, de forma similar al caso de las sales de la laguna del experimento 2, sin embargo se obtuvo mayor formación de cristales de tipo ortorrómbico. Igualmente, el cambio en la morfología ocurre por la presencia de distintos hábitos cristalinos como se muestra en las imágenes 1, 2, 3 y 8, lo cual se analizó por termogravimetría.

6.8 Análisis Termogravimétrico de las sales obtenidas del experimento 3: con viento y radiación

Para el estudio de los hábitos cristalinos del carbonato de sodio se procedió a realizar un análisis termogravimétrico, cuyas sales fueron obtenidas de la evaporación del experimento 3: con viento y radiación, ensayo 1, recolectados de la laguna y panel, las cuales fueron identificadas por Difracción de Rayos X como carbonato de sodio heptahidratado ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). (Figura 83).

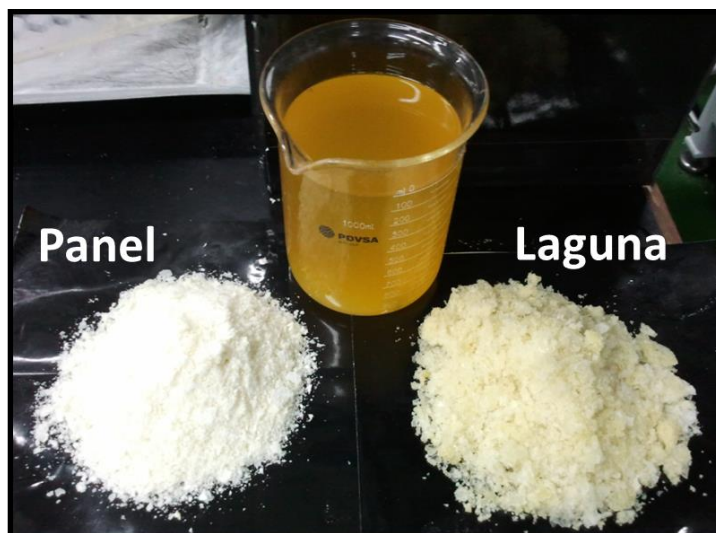


Figura 83. Sales obtenidas de la laguna y panel de evaporación

6.8.1 Análisis termogravimétrico de una muestra de carbonato de sodio al 99,9% de pureza

Se inició realizando un análisis termogravimétrico (Figura 84) a una muestra de carbonato de sodio al 99,9% de pureza que se empleó como base para la discusión de los resultados obtenidos de la muestra de carbonato de sodio heptahidratado recolectada de la evaporación. Las condiciones de trabajo inicial para dicha muestra

fueron 15,3 mg de Na_2CO_3 al 99,9% de pureza, contenidas en un crisol de alúmina, desde 20 °C hasta 1040 °C a través de una rampa de temperatura de 15 °C por minuto.

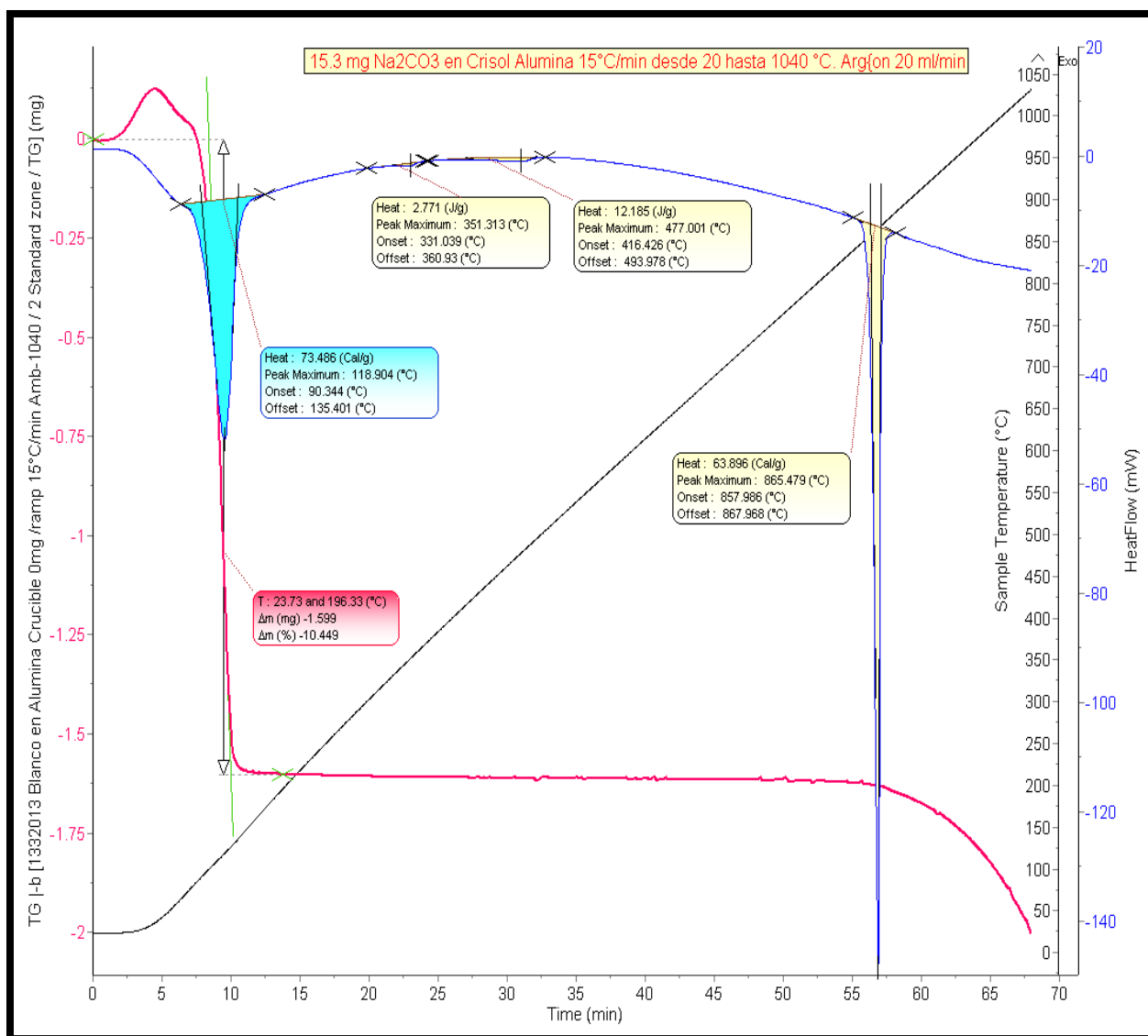


Figura 84. Análisis termogravimétrico de una muestra de Na_2CO_3 al 99,9% de pureza

El carbonato de sodio se caracteriza por ser una sustancia higroscópica, es decir que absorbe con facilidad la humedad contenida en el aire, es por ello que en el análisis termogravimétrico se observa una pérdida de masa por evaporación del agua de un

10,449%, especificada por la línea de color rosada. Entre un rango de temperatura de 90,344 – 135,401 °C representada por la línea de color azul, denominada diferencial calorimétrico, se obtiene la evaporación del agua contenida en el carbonato, quedando carbonato de sodio anhidro. La cantidad de calor requerida para llevar a cabo el cambio de fase, es decir, el calor latente de fusión fue de 63,896 cal/g, un poco menor respecto a los valores reportados en el CRC Handbook of Chemistry and Physics ^[48] de 66,000 cal/g.

Entre una temperatura de 857,986 – 867,968 °C el diferencial calorimétrico muestra el punto de fusión del carbonato de sodio anhidro con un 1,04% de error respecto a los valores reportados en el CRC Handbook of Chemistry and Physics de 854,0 °C. Finalmente, el diferencial de masa al pasar el punto de fusión muestra una caída de la pendiente que se debe a la descomposición de la muestra y por consiguiente liberación de CO₂ (comportamiento igualmente observado en los análisis termogravimétricos de las sales del panel y laguna).

A temperaturas entre 331,039 – 360,930 °C y 416,426 – 493,978 °C representadas por el diferencial calorimétrico, se observan las transiciones polimórficas del carbonato de sodio asociadas con la deshidratación de la sustancia, es decir, que la sal puede tener varias formas o estructuras cristalinas sin cambiar su naturaleza a consecuencia del cambio de temperatura. ^[49]

6.8.2 Análisis termogravimétrico de sales recolectadas del panel de vaporación

Se procedió a realizar el análisis termogravimétrico a una muestra de sales recolectadas del panel de evaporación como se muestra en la Figura 85. Las condiciones iniciales empleadas fueron las mismas que en el apartado anterior a excepción del peso de la muestra que fue de 15,8 mg.

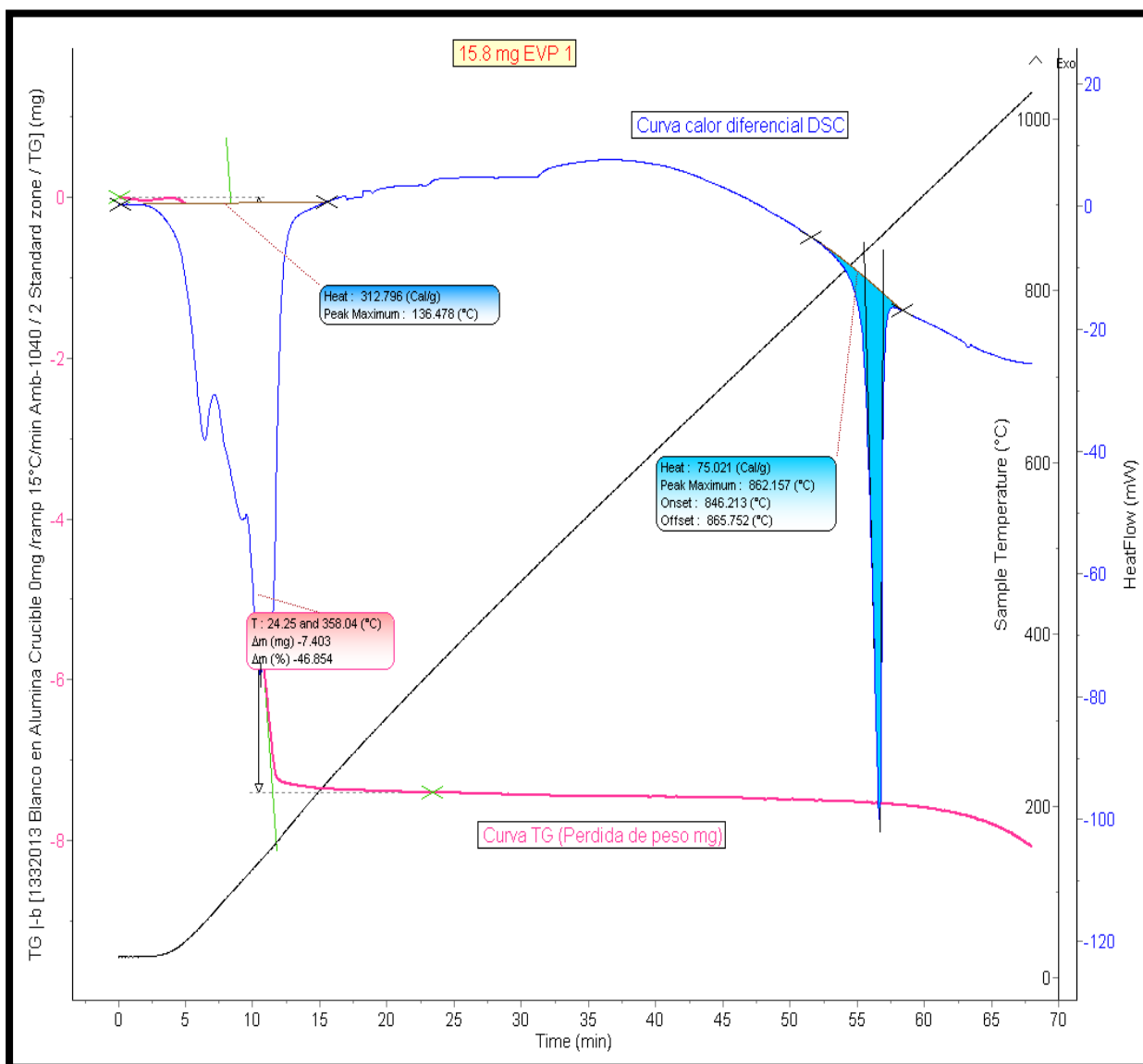


Figura 85. Análisis termogravimétrico de una muestra de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ procedente del panel de evaporación

El diferencial calorimétrico de la muestra mostró una pérdida de agua por evaporación a una temperatura promedio de 136,478 °C, y un calor necesario para llevar el cambio de fase de 312,796 cal/g. Sin embargo, calorimétricamente el consumo de energía para pasar el agua de cristalización a vapor ocurrió en escalas, es decir, los resultados

muestran que la evaporación pudo no sólo deberse a las siete (7) moléculas de agua identificas por DRX ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) si no que pueden estar involucradas otras formas cristalinas hidratadas que no permitieron una caída lineal de la pendiente del diferencial calorimétrico como se muestra en la Figura 86.

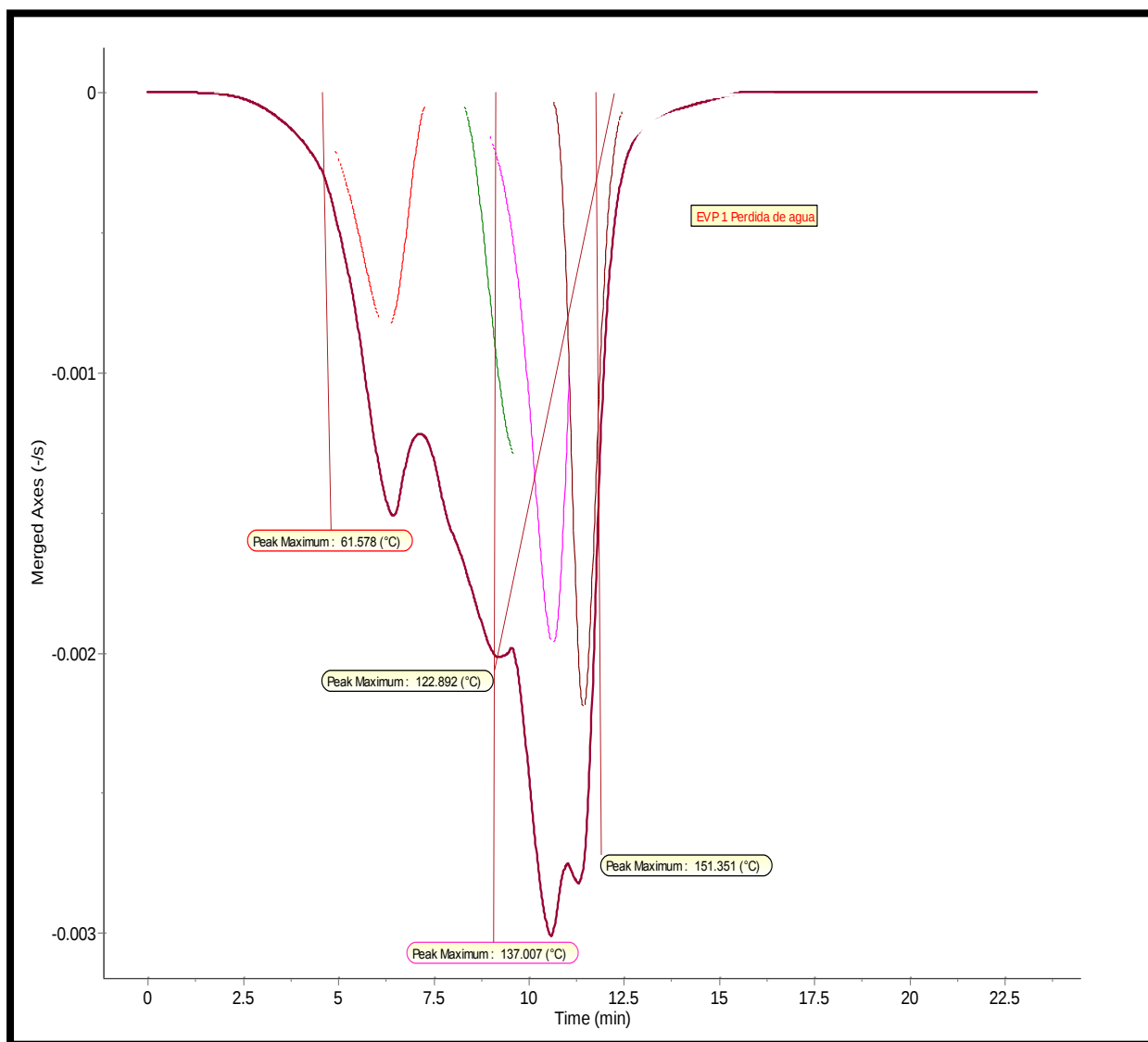


Figura 86. Variación del diferencial calorimétrico en la deshidratación del carbonato de sodio heptahidratado recolectado del panel

La pérdida de masa correspondiente a la evaporación del agua de la muestra en estudio fue de 46,854%, un valor mayor al obtenido por el carbonato de sodio puro y muy aproximado a la cantidad correspondiente de agua de cristalización contenida en el $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ correspondiente a 54,33%. En la Figura 87 se observa la curva del termograma (línea de color rosada) que representa la pérdida de peso en mg y su correspondiente derivada (línea de color azul) que indica la pérdida de masa en mg por minuto, es decir, evidencia el intervalo donde ocurre pérdida de peso.

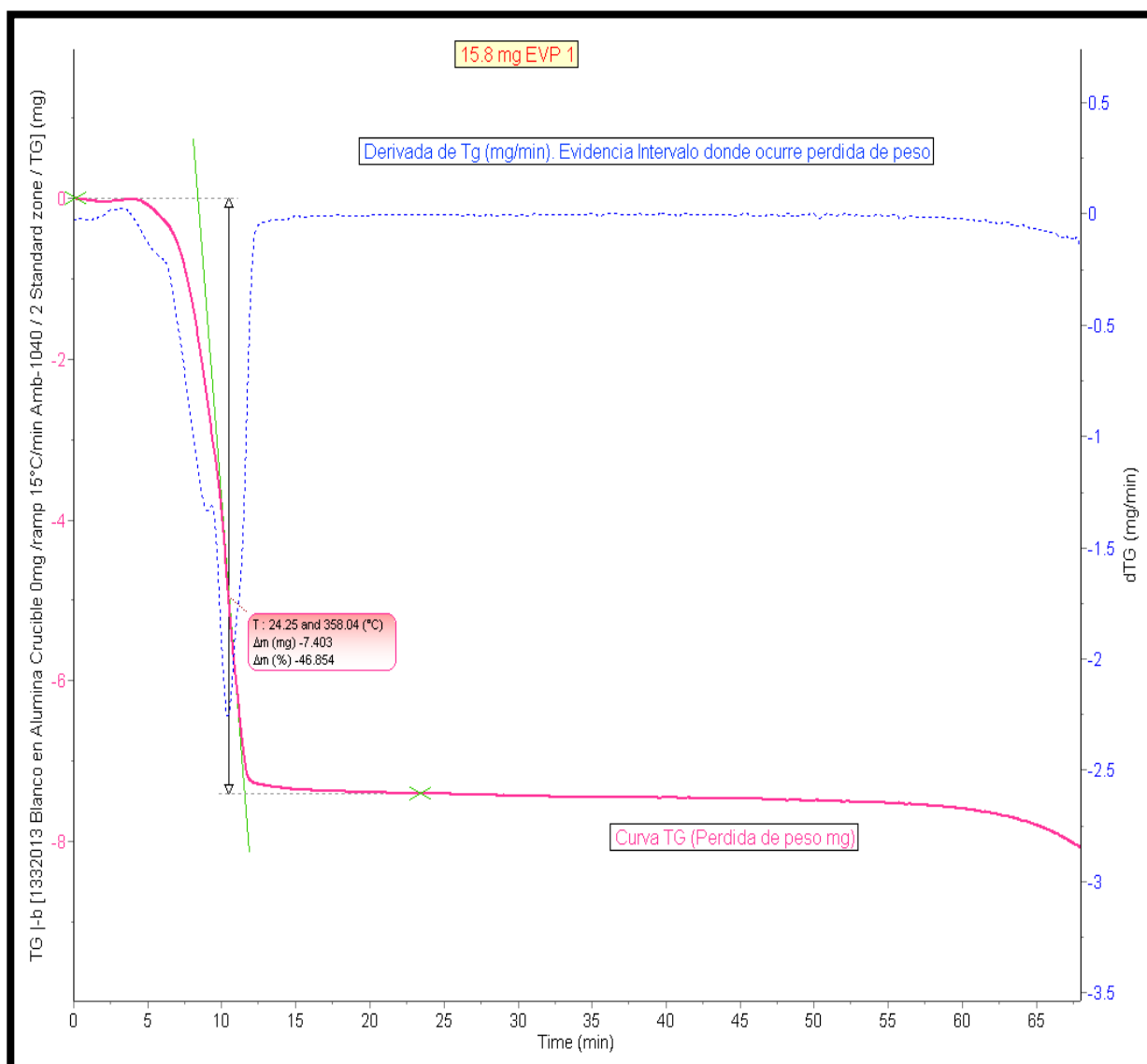


Figura 87. Evidencia de pérdida de peso en el TGA de las sales obtenidas del panel

Una vez deshidratada la muestra se observa como la masa se mantiene constante al aumentar la temperatura hasta alcanzar el punto de fusión en un intervalo de 846,213 – 865,852 °C representada por el diferencial calorimétrico, cuyo promedio posee alta exactitud con respecto al punto de fusión reportado en el CRC Handbook of Chemistry and Physics de 854,0 °C. Este resultado indica que la muestra de carbonato obtenida del panel por medio de la evaporación del licor cáustico con viento y radiación posee un alto porcentaje de pureza.

6.8.3 Análisis termogravimétrico de sales recolectadas de la laguna

Para el análisis termogravimétrico de las sales recolectadas de la laguna se pesó 17,0 mg de muestra y se aplicó las mismas condiciones que en los casos anteriores.

El diferencial calorimétrico muestra una caída de la pendiente en escalas para la evaporación del agua de cristalización, tal como se explicó en el caso anterior, de las sales recolectadas del panel, lo cual pudo deberse a hábitos cristalinos hidratados no identificados en los análisis por DRX. Estos valores obtenidos por el diferencial calorimétrico, tanto en el panel como en la laguna, indican la posible presencia de diferentes hábitos cristalinos, siendo el más abundante la forma heptahidratada, como se puede observar en la Figura 88.

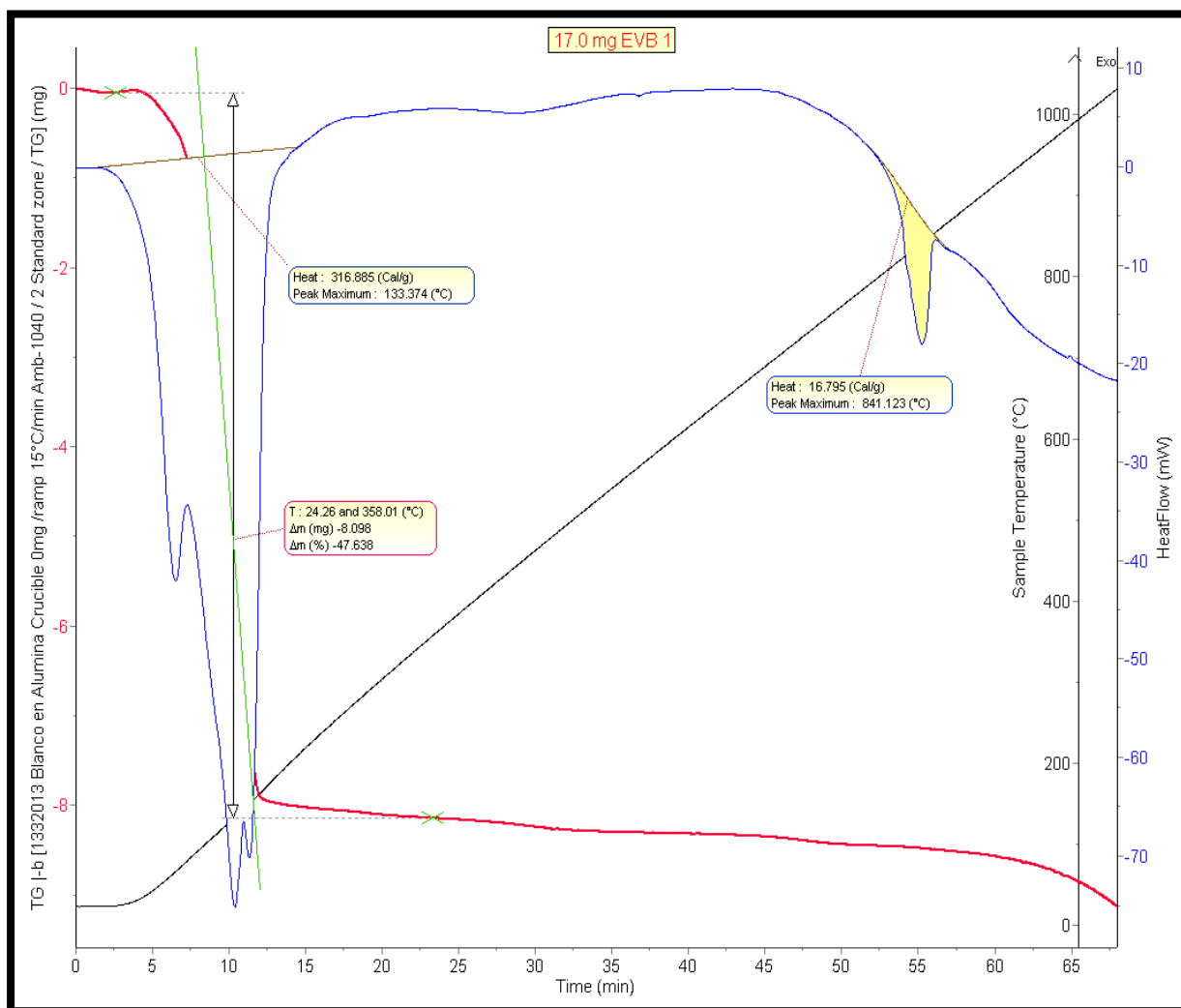


Figura 88. Análisis termogravimétrico de una muestra de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ procedente de la laguna evaporación

El diferencial de masa indica una pérdida de 47,638%, resultado muy aproximado al caso anterior y a la cantidad de agua de cristalización correspondiente para el carbonato de sodio heptahidratado, que como ya se mencionó corresponde a 54,33%, llevándose a cabo a una temperatura promedio de 133,374 °C. En la Figura 89 se obtuvo la derivada de la curva termograma, que evidencia la pérdida de masa en la evaporación del agua de cristalización.

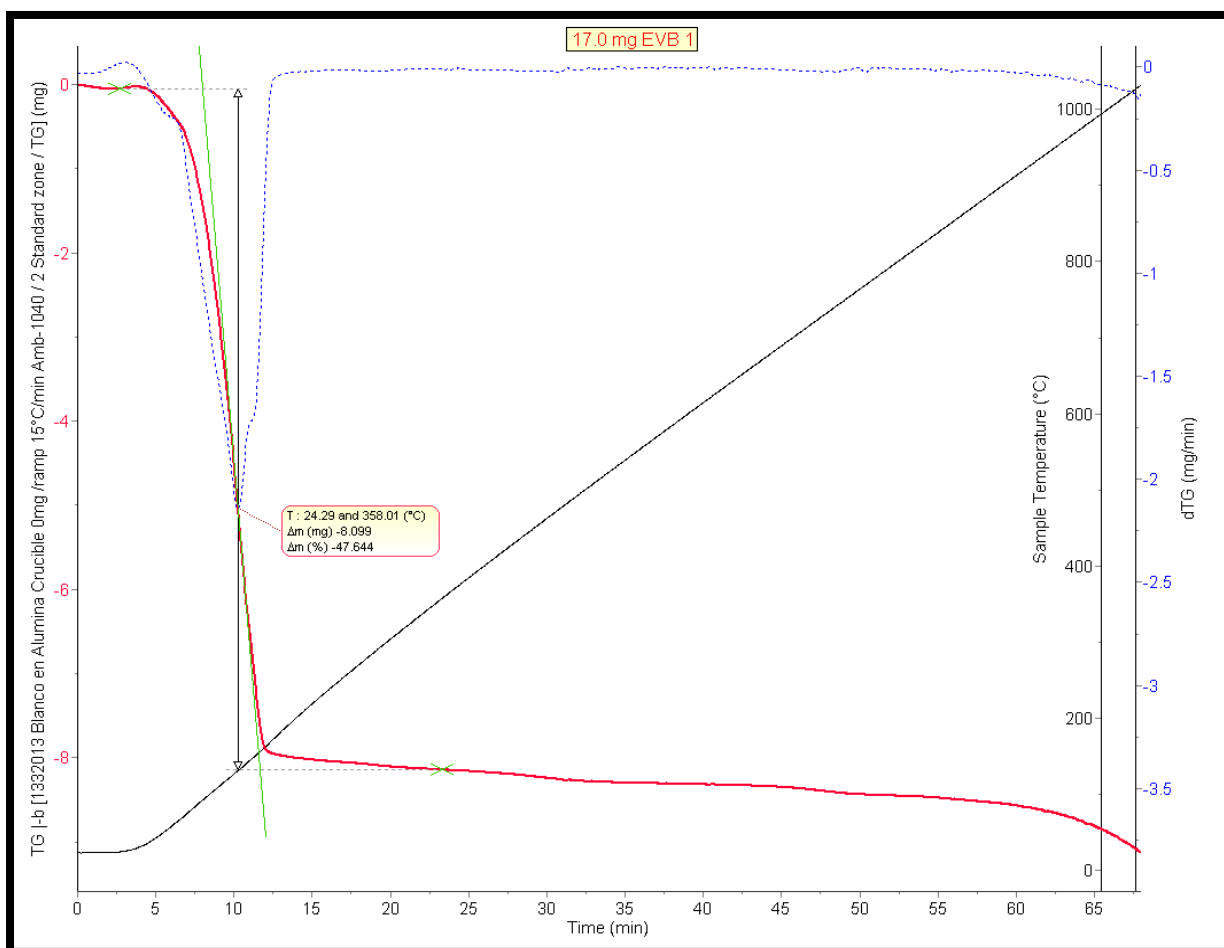


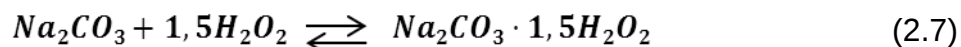
Figura 89. Evidencia de la pérdida de peso en el análisis TGA de las sales obtenidas de la laguna

El punto de fusión registrado fue de 841,123 °C, un poco menor a los casos anteriores, lo cual indica que las sales recolectadas de la laguna presentaron un menor porcentaje de pureza.

6.9 Síntesis del percarbonato de sodio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$)

A partir de la reacción entre el peróxido de hidrógeno al 30% y 104,15 g de carbonato de sodio, se obtuvo 73,12 g de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ con un 46,7% de rendimiento que no pudo ser purificado. El bajo rendimiento del producto pudo deberse al grado de pureza del carbonato obtenido de la evaporación del licor cáustico, por las condiciones del medio ambiente como la humedad o por el hábito cristalino del carbonato empleado (heptahidratado).

La reacción involucrada para la formación del $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ es de adición entre el componente sólido (carbonato) y el peróxido de hidrógeno como se muestra a continuación. ^[39]

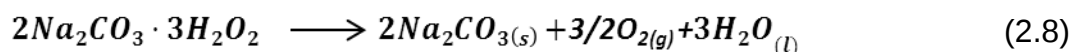


El producto obtenido tuvo la forma de un polvo granular blanco (Figura 90) con excelente solubilidad en agua y alta tasa de disolución. Combina propiedades del peróxido de hidrógeno con las propiedades del carbonato de sodio en un formato fácil de usar, generando capacidades de amortiguación de aguas e incremento de los niveles de oxígeno en las mismas.



Figura 90. $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ sintetizado de las sales obtenidas de la evaporación

La descomposición del $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ está acompañada de la liberación de oxígeno y agua (Ver reacción 2.8), los cuales son sustancias naturales que no contaminan el medio ambiente, sin embargo, pueden apoyar la combustión y provocar estallidos de presión en espacios reducidos. Ante materia orgánica, la descomposición puede ser altamente rápida y exotérmica. [50]



En agua el $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ funciona como fuente de peróxido de hidrógeno favoreciendo la oxidación electrófila como se muestra en la reacción (2.9) y en la Figura 91. [51]

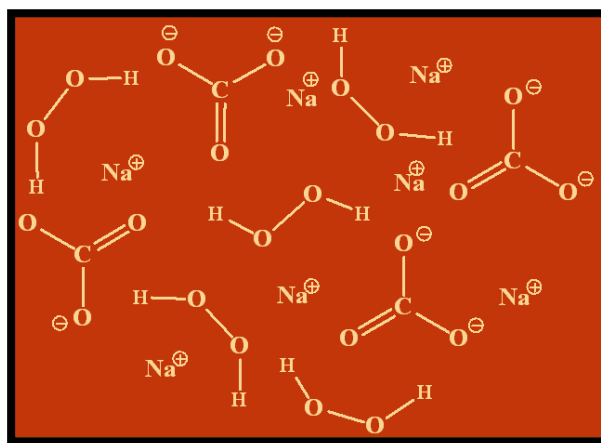
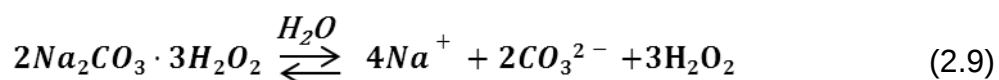
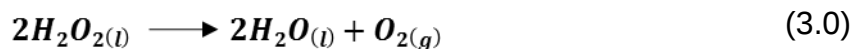


Figura 91. $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ en solución acuosa

Como reacción subsecuente se obtiene la del peróxido generando oxígeno y agua (reacción 3.0).



6.10 Determinación de oxígeno disuelto en $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$

Se realizó la medición de oxígeno disuelto en una muestra de agua destilada obteniendo una concentración de 2,84 mg/L que se empleó en la corrección de los resultados posteriores.

La determinación de oxígeno disuelto del $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ sintetizado a partir del $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ producido en la evaporación del sistema, arrojó los resultados que se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Oxígeno disuelto en el $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$

Peso de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ (g $\pm$ 0,0001)	Oxígeno disuelto (mg/L)
10,1752	33,44
10,0549	36,77
10,0822	35,64
10,0480	34,81

En promedio se obtuvo 35,16 mg/L de oxígeno disuelto que se generaron tras las reacciones 2.9 y 3.0 mostradas en el apartado anterior. Estos valores obtenidos fueron comparados con el producto comercial Nevex, empleado como detergente, el cual posee en solución 33% de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$, el cual tiene la función de aumentar la concentración de oxígeno una vez que reacciona con el agua y así promover la formación de espuma. Los resultados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Oxígeno disuelto en el producto comercial Nevex

Peso de $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ (g $\pm$ 0,0001)	Oxígeno disuelto (mg/L)
10,0878	17,52
10,3142	18,08
10,2276	18,01
10,0145	17,09

Se obtuvo un promedio de oxígeno disuelto de 17,68 mg/L en la muestra comercial, un resultado por debajo del $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ sintetizado. Con estos resultados se determinó por estequiometría que el compuesto producido de las sales de la evaporación se encuentra en un 68% por cada 10 g de muestra.

Es por esta razón que $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$ obtenido a partir del pasivo ambiental denominado licor cáustico, tras un proceso de evaporación por medio de un sistema acelerado de evaporación forzada, podría emplearse en el tratamiento de aguas contaminadas aumentando la concentración de oxígeno y por lo tanto promoviendo la oxidación de moléculas orgánicas.

7. CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

- En el experimento 3 donde se simulaban simultáneamente las condiciones meteorológicas de viento y radiación solar de Puerto Ordaz – Edo. Bolívar, permitieron obtener la tasa de evaporación máxima de 0,302 mm/h en comparación con los experimento 1 y 2 donde sólo se aplicó viento y ningún factor meteorológicos para las cuales se obtuvieron 0,196 mm/h y 0,146 mm/h respectivamente.
- Con el experimento 3 se logró incrementar la tasa de evaporación con respecto al experimento 1 en una relación 2:1, en comparación con el experimento 2 donde se obtuvo un incremento respecto al experimento 1 en una relación 1,3:1.
- La tasa de evaporación máxima lograda en el experimento 3 correspondió a 2645,52 mm/año cuya tasa de evaporación se asemeja la tasa promedio anualizada del sistema lagunar ubicado en Cambalache, Municipio Caroní – Edo. Bolívar de 2182 mm/año. Los resultados obtenidos indican que la combinación entre el sistema lagunar y la evaporación acelerada forzada incrementarían la tasa de evaporación en 4827,52 mm/año.
- La simulación de viento y radiación en el experimento 3 permitió disminuir la humedad relativa e incrementar la tasa de evaporación.
- El panel de evaporación produjo un aumento del área superficial de exposición en aproximadamente 57 m² acelerando el proceso al generarse una película fina del líquido el cual absorbe con mayor eficiencia la energía proporcionada por la radiación, en comparación con la laguna donde se dispone el licor que presentó un área aproximada de 0,2585 m² y en la cual se llevó a cabo un proceso de evaporación natural.

- Las sales obtenidas de la evaporación experimental recolectadas de la laguna y del panel de evaporación fueron identificados como carbonato de sodio heptahidratado cuya morfología presentó la formación ortorrómbica que caracteriza la sal en combinación con un alto porcentaje de cristales con estructura amorfa debido al contenido de agua de cristalización.
- La alcalinidad presente en el licor cáustico de las lagunas ubicadas en Cambalache, Municipio Caroní – Edo. Bolívar se debe a la alta concentración de carbonato de sodio favoreciendo un pH básico.
- La densidad medida de las lagunas 2 y 3 fueron 1,080 g/mL y 1,210 g/mL respectivamente.
- El control de la temperatura y humedad relativa permite la obtención de hábitos cristalinos del carbonato de sodio tales como el mono, hepta y decahidratado lo cual es consistente con la literatura.

8. RECOMENDACIONES

8. RECOMENDACIONES

- Evaluar el sistema acelerado de evaporación forzada con simulación de viento y radiación solar de Puerto Ordaz – Edo. Bolívar, con variación del ángulo de inclinación del panel de evaporación, con la finalidad de estimar si el ángulo de incidencia de la radiación y del viento producen una disminución del tiempo para la evaporación de muestra de licor cáustico extraído de las lagunas 2 y 3 de Cambalache – Edo. Bolívar.
- Determinar el grado de oxidación del percarbonato de sodio que se obtuvo con 46,7% de rendimiento y que proporcionó un aumento de la concentración de oxígeno disuelto en agua destilada de 35,16 mg/L, sintetizado a partir del carbonato de sodio heptahidratado obtenido de la evaporación del licor cáustico, para ser utilizado en procesos de oxidación avanzada dentro de la industria petrolera.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- [1] Smith, W. (2004). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Tercera edición. McGraw-Hill. España.
- [2] Freif, S. y Parkinson, G. (2005). *Surface morphology and crystal growth mechanism of gibbsite in industrial Bayer liquors*. Hydrometallurgy. Pág. 246-255.
- [3] Martínez, S.; Gorostidi, J. y Grjotheim, K. (1993). *La metalurgia del aluminio*. Aluminim-Verlag. Madrid, España.
- [4] Authier, M.; Forté, G.; Ostap, S. y colaboradores (2001). *The mineralogy of bauxite for producing smelter-grade alumina*. Journal of the minerals, metals and materials society. Pág. 56-86.
- [5] Addai, J.; Li, J. y Zbik, M. (2003). *Sodium aluminosilicate solid phase specific fouling behavior. Heat exchanger fouling and cleaning: Fundamentals and applications*. Pág. 68-74.
- [6] Songqing, G. y Zhonglin, Y. (2004). *Preheaters and digesters in the Bayer digestion process*. Light Metals. Pág. 35-40.
- [7] Aluminum compounds. (1991). *Kirk-Othmer Encyclopedia of chemical technology*. Vol II. Pág. 254-261.
- [8] Woloshyn, J.; Oshinowo, L. y Rosten, J. (2006). *Digester desing using CFD*. Light metals. Pág. 936-944.
- [9] Gómez, J. (2004). *Estudio de la cinética de aglomeración y crecimiento de cristales de gibbsita $[Al(OH)_3]$ modificando la etapa de cristalización del proceso Bayer de C.V.G – Bauxilum*. (Tesis de pregrado). Universidad de Oriente. Cumaná-Venezuela.
- [10] Armstrong, J. y Dann, S. (2000). *Investigation of zeolite scales formed in the Bayer process*. Microporous and mesoporous materials. Pág. 89-97.
- [11] The Columbia Encyclopedia. (2008). *Bayer process*. Vol I. Pág. 326-330.
- [12] Velásquez, A. (2008). *Efecto de las condiciones de predesilicación y digestión sobre el nivel de sílice usando bauxita los Pijiguaos durante el proceso Bayer en C.V.G. Bauxilum*. Universidad de Oriente, Venezuela.

-
- [13] Tizon, E.; Clerin, P. y Cristol, B. (2004). *Effect of predesilication and digestion conditions on silica level in Bayer liquor. Light metals*. Pág. 9-14.
- [14] Louet N.; Gonon, M. y Fantozzi, G. (2005). *Influence of the amount of Na₂O and SiO₂ on the sintering behavior and on the microstrutural evolution of a Bayer alumina poder. Ceramics international*, Pág. 981-987.
- [15] Kiely, G. (1999). *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Volumen III, McGraw-Hill. Madrid, España.
- [16] Rodriguez, M. y Meza, J. (2003). *Características clínico-epidemiológicas en pacientes con ingesta de cáusticos en el Hospital Hipólito Unanue*. Revista gastroenterología. Perú. No. 23.
- [17] Gillespie, H. y Baird, W. (1990). *Química*. Editorial Reverté, S.A. Universidad de Valencia, España. Pág. 695.
- [18] Gaceta oficial de la República Bolivariana de Venezuela 1998-08-03 N° 5295 Extraordinario. Decreto 2635 mediante reforma del decreto 2289, *Normas para el Control de la Recuperación de Materiales Peligrosos y el Manejo de los Desechos Peligrosos*.
- [19] Ciencia Guayana. (2005). *El origen de los lodos rojos*. Extraído el 23 de mayo de 2012. Disponible en: <http://cienciaguayana5.blogspot.com/2005/08/el-origen-de-los-lodos-rojos.html>.
- [20] Satorra, J. (2009). *Entre químicos y basuras viven en barrio cambalache de Bolívar (Quema de desechos y las lagunas de CVG, producen cuantiosos daños ambientales)*. Periódico EL UNIVERSAL. Extraído el 26 de Mayo de 2011. Disponible en: http://www.eluniversal.com/2009/09/07/pol_art_entre-quimicos-y-bas_1559364.shtml.
- [21] Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela 1995-10-11 N° 5021. Decreto 883: *Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos*.
- [22] Pérez, M. y Barrios, M. (2010). *Capture and sequestration of CO₂ produced by in situ combustion pilot project, Orinoco oil belt, Venezuela*. PDVSA-Intevep. Edo. Miranda - Venezuela.

-
- [23] Hewitt, P. (2004). *Física Conceptual. Evaporación*. Editorial Pearson Addison Wesley, Novena Edición. Pág. 327.
- [24] Prieto, C. (2004). *El Agua. (Sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación)*. Ecoe Ediciones. Bogotá – Colombia. Pág. 32.
- [25] FILTEC, Especialistas en filtración, depuración y tratamiento de aguas. *Evaporados HBS 08, (Concentración de líquidos por evaporación natural acelerada)*. Extraído el 3 de Julio de 2012. Disponible en: <http://www.ictisp.com/~filttec/evaporador.htm>.
- [26] Catálogo “NOZZLES” IT EN E Ediz, Rev 4. (2010). *Euspray® by eurosprayspray and filter technology*. Barcelona.
- [27] Pocovi, E. (S/F). *Ventilación Industrial, descripción y diseño de los sistemas de ventilación industrial*. Ediciones MAGNA PUBLICACIONES. Universidad Nacional de SALTA. Argentina.
- [28] Guevara, E. y Cartaya, H. (1991). *Hidrología (Una introducción a las ciencias aplicada)*. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CODECIH) de la Universidad de Carabobo. Venezuela. Pág. 77-92.
- [29] Menolasina, S. y Meléndez. S. (S/F). *Manual de prácticas de laboratorio de fisicoquímica. Gráfica de Humedad*. Publicaciones Vicerrectorado académico CODEPRE. Pág. 26-27.
- [30] Universia. *El Clima en Venezuela*. Extraído el 14 de Agosto de 2012. Disponible en: <http://internacional.universia.net/latinoamerica/datos-paises/venezuela/clima.htm>
- [31] Tiempo.com by meteored. *Tiempo en Puerto Ordaz, Venezuela*. Extraído el 25 de Junio de 2012. Disponible en: http://www.meteored.com.ve/tiempo-en_Puerto+Ordaz-America+Sur-Venezuela-Bolivar--1-23785.html
- [32] Toro, J.; Dölling, O. y Varas, E. (2004). *Evaporación con el método Penman usando redes neuronales artificiales*. Sociedad Chilena de ingeniería hidráulica. XVII congreso chileno de ingeniería hidráulica. Santiago de Chile – Chile.
- [33] Frost, K. y Schwalen. H. (1955) *Sprinkler evaporation losses*. Journal of agricultural and Grainage Engineering. Vol. 36. Pág. 526-528.

-
- [34] Incropera, F. y Dewitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Cuarta Edición. Editorial PEARSON Prentice Hall. México. Pág: 3-12.
- [35] Çengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. Editorial McGraw-Hill Interamericana. Universidad de Nevada, Reno. Pág. 27.
- [36] Jimenéz, M., Orrego, S. y Orozco, A. (2008). *Proceso para producir percarbonato de sodio a escala piloto*. Revista Universidad EAFIT. Vol. 45. No. 154. pp 19-30.
- [37] Paradis, R. (1993). *Application of Alcan's deep thickener technology for thickening and clarifying*. In: Leung, W.W.-F. (Ed), *Advances in filtration and separation technology: system approach to separation and filtration process equipment* American filtration & separations society. Chicago, pág. 176-179.
- [38] CVG Bauxilum. (S/F). *Evaluación de Amenazas y Vulnerabilidad. Aspectos Geoquímicos*. Lagunas de Lodos Rojos, Zona Industrial Matanzas, Ciudad Guayana, Estado Bolívar. 2003.
- [39] François, J. (2005). *Evaporación natural acelerada: Una alternativa al tratamiento de riles vitivinícolas*. Seminario, AS&D Consultores. Santa Cruz – Chile.
- [40] Chacón, M. (2008). *Propuesta de procedimiento físico para el tratamiento de hidróxido de sodio en desechos industriales*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Experimental de Guayana.
- [41] Pauer, G.; Gräfe, M. y Klauber, C. (2011). *Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practice*. Published by elsevier B.V. All rights reserved.
- [42] Rogola, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. Ediciones Alfaomega marcombo. PRODUCTICA. Barcelona – España.
- [43] General Chemical Industrial Products. (S/F). *Soda Ash*. Disponible en: www.Genchem.com/pdf/SodaAshTech.pdf. Extraído el 1 de abril de 2013.
- [44] Diccionarios OXFORD – COMPLUTENSE. (2003). *Química*. Registrado por Oxford University Press.
- [45] Kane, J. y Sternheim, M. (2007). *Física*. Fuerza de cohesión de los líquidos. Segunda Edición. Editorial Reverté. Barcelona – España. Pág. 32.

-
- [46] Rolle, K. (2002). *Termodinámica*. Sexta Edición. Ediciones Pearson Prentice Hall. Ciudad de México – México. Pág. 462.
- [47] Servicios de asesoramiento al regante. (S/F). *Procedimiento para la realización de evaluaciones de riego por aspersión*. Junta de Andalucía. Extraído de: www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/protocoloaspersion.pdf. Extraído el 9 de abril de 2013.
- [48] Haynes, W. (2013). *CRC Handbook of Chemistry and physics*. 93RD Edición 2012 – 2013.
- [49] Pascual, C. (S/F). *Cristaloquímica. Polimorfismo y transformaciones polimórficas*. Disponible en: ocw.uniovi.es/mod/resource/view.php?impopup=true&id=2964. Extraído el 23 de Marzo de 2013.
- [50] Product data sheet/1.7.2009. (2009). *Oxyper® S142 Sodium Percarbonate*. SOLVAY Chemicals International. SOLVAY S.A. All Rights Reserved.
- [51] Gómez, V.; Moreno, A. y Vázquez, E. (2010). *Oxidación quimioselectiva de sulfuros: Estudio del carácter electrófilo – nucleófilo de perborato sódico y percarbonato sódico*. Departamento de química orgánica, Facultad de Química, Universidad de Castilla – La Mancha. España.