

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA
Y DE MATERIALES**



**“DETERMINACIÓN Y MODELACIÓN DE PROPIEDADES
TERMODINÁMICAS Y FISICOQUÍMICAS DE SOLUCIONES DE
TETRABORATO DE LITIO, TETRABORATO DE SODIO Y
METABORATO DE LITIO A 25, 35 Y 45°C”**

BRIAN STEVE NOLAN ESPINOSA

**Memoria de titulación para optar al título de Ingeniero Civil
Metalúrgico**

PROFESOR GUÍA: FRANCISCA JUSTEL RETAMAL

PROFESOR CORREFERENTE: YECID JIMÉNEZ BELLOTT

OCTUBRE 2024

AGRADECIMIENTOS

Como es debido, agradezco inicialmente a mi familia por el apoyo en todo ámbito en esta larga y dificultosa tarea de finalizar mis estudios universitarios, dándome los ánimos en los peores momentos y celebrando los mejores conmigo, sin esperar nada más que mi desarrollo como persona, educacional, profesional y, principalmente, mi felicidad.

Además, agradezco al Departamento de Ingeniería Civil Metalúrgica y de Materiales, a todos y cada uno de quién conforma este departamento que no podría pensar en uno mejor para haber estado durante este largo tiempo; los apoyos académicos, el personal de aseo y mantenimiento, secretaría y obviamente, los profesores, con los cuales siempre tuve una experiencia, al menos, fructífera en el proceso de aprendizaje a pesar de todo. No podría agradecer a cada uno particularmente, sin embargo, he de agradecer especialmente a dos miembros del personal académico: Primero a la profesora Francisca Justel, por confiar en mí para la realización de esta memoria bajo el programa Fondecyt y me ha apoyado en la realización de esta, además de otros proyectos y cursos para mi desarrollo académico y, finalmente y con mucho aprecio al difunto profesor Héctor Henao, quién fue el que me mostró el potencial y valor que tenía, dándome a entender que lo importante es el valor humano y las ansias de conocer y aprender, más que el número al final del cualquier ramo. Agradezco haber estado bajo su tutela como ayudante por más de dos años y me hubiese gustado que fueran más. Sus enseñanzas y la esperanza que él me hizo descubrir, las recordaré siempre con mucha felicidad y las llevaré siempre en mi desarrollo profesional y académico. Espero llegar a ser tan buen profesor, ingeniero y persona como lo fue él, muchas gracias.

Finalmente, he de agradecer a la institución misma, la Universidad Técnica Federico Santa María, en la cual he podido avanzar, a veces lento y otras veces rápido en mi formación, tanto académica como humana, ya sea por el mundo académico, como las actividades que ofrece, principalmente el Coro UTFSM en donde pude desarrollarme como músico y hacer unas hermosas amistades y más, que mantendré siempre, sacando la rigidez propia que se crea en un aula, con la música y la interacción de un hermoso grupo de personas.

RESUMEN

Se determinaron las propiedades fisicoquímicas de densidad, pH y conductividad a 25, 35 y 45°C, y de la propiedad termodinámica de actividad del agua a 25°C, de los sistemas de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$, $\text{LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$ y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$, para luego, a partir de su correlación, obtener los parámetros de modelos empíricos y compararlos entre sí, resultando en la utilización de la Regla de Othmer para la densidad y los modelos propuestos por Claros para el pH y la conductividad, en el caso de la actividad estos datos experimentales fueron correlacionados con el modelo de Pitzer para obtener los parámetros termodinámicos correspondientes. Todos los modelos fueron ajustados por medio de la minimización de errores cuadrados obteniendo desviaciones menores a 0.015, 2.62, 0.34 y 0.55, para la densidad, conductividad, pH y actividad del agua, respectivamente. Se realizaron pruebas de límite de saturación en agua a 25°C a estas sales midiendo su densidad durante 43, 37 y 9 días, obteniendo solubilidades de saturación mediante absorción atómica de 28.02, 33.47 y 26.26 [g/L], respectivamente. Se plantearon 3 casos de cristalización por precipitación de cada sal para una salmuera inicial con composición estimada del Salar de Atacama y por medio de los diagramas de fases en literatura, se obtuvo que la recuperación neta de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ es mayor por medio del secado directo de la salmuera y decrece con adiciones de sal anhidra en el sistema existente, mientras que la recuperación neta de $\text{LiBO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ es creciente con adiciones de sal anhidra al sistema y para esta salmuera es necesaria una razón de porcentaje de masa de sales $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7/\text{LiBO}_2$ de 0.02378 para una recuperación de sal mayor a la agregada al sistema finalmente, la recuperación neta de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ es decreciente para cualquier adición de sal anhidra y el secado puro de salmuera genera la precipitación de NaCl, siendo el proceso de precipitación de tetraborato de sodio inviable para esta salmuera.

ABSTRACT

Measurements of physicochemical properties of density, pH and conductivity at 24, 35 and 45°C, and thermodynamic property of water activity at 25°C, of the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$, $\text{LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$ y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ systems, obtaining empiric models parameters to compare, resulting in the utilization of the Othmer rule for density and the models proposed by Claros for pH and conductivity, and the Pitzer parameters fitted with water activity for the thermodynamics parameters. All models were fitted with the minimization of the square error with deviation lower than 0.015, 2.62, 0.34 and 0.55, for density, conductivity, pH and water activity, respectively. Solubility limit tests at 25°C were conducted for all three salts measuring their densities for 43, 37 and 9 days, resulting in saturation solubilities of 28.02, 33.47 and 26.26 [g/L] by atomic absorption analysis, respectively. 3 precipitation cases were studied for each salt for a given brine estimated from Salar de Atacama, trough phases diagram in literature, where the net recovery of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ is higher by direct brine drying process and decreasing with additions of anhydrous salt to the existing system, meanwhile the net recovery of $\text{LiBO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ is increasing with additions of anhydrous salt and a mass percentage reason $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 / \text{LiBO}_2$ of 0.002378 is needed for a higher salt recovery than the amount added to the system, finally, the net recovery of $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ is decreasing for any anhydrous salt addition and dry only process of the brine generates precipitation of NaCl, being the precipitation process of sodium tetraborate for this brine non-viable.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
ÍNDICE	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	9
1.1 INTRODUCCIÓN	9
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	12
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	13
2.1 REVISIÓN DE MODELO TERMODINÁMICO DE PITZER.....	13
2.2 REVISIÓN DE MODELOS DE EMPÍRICOS.....	16
2.3 ANTECEDENTES	16
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	19
3.1 DESCRIPCIÓN DE MATERIALES E INSUMOS	19
3.1.1 TETRABORATO DE LITIO	19
3.1.2 TETRABORATO DE SODIO	19
3.1.3 METABORATO DE LITIO	19
3.2 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS.....	20
3.2.1 DENSÍMETRO DIGITAL	20
3.2.2 MEDIDOR DE LABORATORIO DE MESA.....	20
3.2.3 BAÑO DE RECIRCULACIÓN.....	21
3.2.4 INCUBADORA DE HIBRIDACIÓN	22
3.2.5 MEDIDOR DE ACTIVIDAD DE AGUA	22
3.2.6 BALANZA ANALÍTICA	23
3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	23
3.3.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	23
3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	26
3.5 DISEÑO DE PRECIPITACIÓN	27

3.6	CARTA GANTT	27
------------	--------------------------	-----------

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES 28

4.1	TETRABORATO DE LITIO	28
4.1.1	MEDICIÓN DE DENSIDAD	28
4.1.2	MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD	30
4.1.3	MEDICIÓN DE PH.....	32
4.1.4	MEDICIÓN DE ACTIVIDAD DEL AGUA	34
4.2	METABORATO DE LITIO	35
4.2.1	MEDICIÓN DE DENSIDAD	35
4.2.2	MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD	36
4.2.3	MEDICIÓN DE PH.....	38
4.2.4	MEDICIÓN DE ACTIVIDAD DEL AGUA	40
4.3	TETRABORATO DE SODIO	40
4.3.1	MEDICIÓN DE DENSIDAD	40
4.3.2	MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD	42
4.3.3	MEDICIÓN DE PH.....	43
4.3.4	MEDICIÓN DE ACTIVIDAD DEL AGUA	45
4.4	PRUEBAS DE SOLUBILIDAD.....	46

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE DATOS 50

5.1	COMPARACIÓN Y ELECCIÓN DE MODELOS PROPUESTOS	50
5.2	ANÁLISIS DE DATOS	51
5.2.1	ANÁLISIS DE DENSIDAD	51
5.2.2	ANÁLISIS DE CONDUCTIVIDAD	54
5.2.3	ANÁLISIS DE PH	59
5.2.4	ANÁLISIS DE ACTIVIDAD DE AGUA	62
5.3	ANÁLISIS DEL EFECTO DE DIFERENCIA DE CATIÓN VS EFECTO DE DIFERENCIA DE ANIÓN	66
5.4	RESUMEN DE PARÁMETROS.....	69

CAPÍTULO 6. MODELO PROPUESTO DE CRISTALIZACIÓN O PRECIPITACIÓN..... 70

6.1	CASO 1: SISTEMA $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$, CON PRECIPITACIÓN DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.....	70
6.2	CASO 2: SISTEMA $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$, CON PRECIPITACIÓN DE LiBO_2.....	71
6.3	CASO 3: SISTEMA $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-NaCl-H}_2\text{O}$, CON PRECIPITACIÓN DE $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.....	72

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES 75

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS..... 77

ANEXOS..... 80

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1 PRODUCCIÓN DE LITIO POR PAÍS AL 2020 [1].	9
FIGURA 1-2 EXPORTACIONES DE CHILE DE ÁCIDO BÓRICO Y ÓXIDOS DE BORO [4].	10
FIGURA 1-3 DISTRIBUCIÓN DE IMPORTACIONES DE USA PERÍODO 2019-2020 [5].	10
FIGURA 2-1 COMPARACIÓN DE DENSIDAD DEL SISTEMA $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O}$ ENTRE LA LITERATURA (TRIANGULO) Y EXPERIMENTAL (CUADRADOS) [26].	18
FIGURA 3-1 TETRABORATO DE LITIO DE ALTA PUREZA.	19
FIGURA 3-2 TETRABORATO DE SODIO DE ALTA PUREZA.	19
FIGURA 3-3 METABORATO DE LITIO DE ALTA PUREZA	20
FIGURA 3-4 DENSÍMETRO DIGITAL ANTON PAAR DMA1001[30]	20
FIGURA 3-5 MEDIDOR DE LABORATORIO DE SOBREMESA HANNA INSTRUMENTS RI5522 [31], [32].	21
FIGURA 3-6 BAÑO DE RECIRCULACIÓN SCIENTZ-BIO, MODELO DC-1006 [33].	22
FIGURA 3-7 INCUBADORA DE HIBRIDACIÓN COMBI-H12 [34]	22
FIGURA 3-8 EQUIPO DE MEDICIÓN DE ACTIVIDAD DE AGUA NOVASINA LABMASTER-AW NEO [35].	23
FIGURA 3-9 BALANZA ANALÍTICA VETO A6709120.	23
FIGURA 4-1 TIEMPO DE EQUILIBRIO DE DENSIDAD DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	47
FIGURA 4-2 TIEMPO DE EQUILIBRIO DE DENSIDAD DE LiBO_2 .	48
FIGURA 4-3 TIEMPO DE EQUILIBRIO DE DENSIDAD DE $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	48
FIGURA 5-1 DENSIDAD VERSUS FRACCIÓN MÁSCICA DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, LÍNEA CONT.: MODELO).	52
FIGURA 5-2 DISPERSIÓN DE ERROR DE DENSIDAD DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	52
FIGURA 5-3 DENSIDAD VS FRACCIÓN MÁSCICA DE LiBO_2 (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, LÍNEA CONT.: MODELO).	53
FIGURA 5-4 DISPERSIÓN DE ERROR DE DENSIDAD DE LiBO_2 .	53
FIGURA 5-5 DENSIDAD VS FRACCIÓN MÁSCICA DE $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, LÍNEA CONT.: MODELO).	54
FIGURA 5-6 DISPERSIÓN DE ERROR DE DENSIDAD DE $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	54
FIGURA 5-7 CONDUCTIVIDAD VS FRACCIÓN MÁSCICA DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, LÍNEA CONT.: MODELO).	55
FIGURA 5-8 DISPERSIÓN DE ERROR DE CONDUCTIVIDAD DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	56
FIGURA 5-9 CONDUCTIVIDAD VS FRACCIÓN MÁSCICA DE LiBO_2 (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, LÍNEA CONT.: MODELO).	56
FIGURA 5-10 DISPERSIÓN DE ERROR DE CONDUCTIVIDAD DE LiBO_2 .	57
FIGURA 5-11 CONDUCTIVIDAD VS FRACCIÓN MÁSCICA DE $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, LÍNEA CONT.: MODELO).	57
FIGURA 5-12 DISPERSIÓN DE ERROR DE CONDUCTIVIDAD DE $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	58
FIGURA 5-13 PH VS FRACCIÓN MÁSCICA DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, LÍNEA CONT.: MODELO).	59
FIGURA 5-14 DISPERSIÓN DE ERROR DE PH DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	60
FIGURA 5-15 PH VS FRACCIÓN MÁSCICA DE LiBO_2 (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, LÍNEA CONT.: MODELO).	60
FIGURA 5-16 DISPERSIÓN DE ERROR DE PH DE LiBO_2 .	61
FIGURA 5-17 PH VS FRACCIÓN MÁSCICA DE $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, LÍNEA CONT.: MODELO).	61
FIGURA 5-18 DISPERSIÓN DE ERROR DE PH DE $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	62
FIGURA 5-19 ACTIVIDAD DE AGUA VS MOLALIDAD DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	63
FIGURA 5-20 DISPERSIÓN DE ERROR DE ACTIVIDAD DE AGUA DE $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	64
FIGURA 5-21 ACTIVIDAD DE AGUA VS MOLALIDAD DE LiBO_2 .	64
FIGURA 5-22 DISPERSIÓN DE ERROR DE ACTIVIDAD DE AGUA DE LiBO_2 .	65
FIGURA 5-23 ACTIVIDAD DE AGUA VS MOLALIDAD DE $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	65
FIGURA 5-24 DISPERSIÓN DE ERROR DE ACTIVIDAD DE AGUA DE $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.	66
FIGURA 5-25 GRÁFICO COMPARATIVO DE DENSIDAD DE LAS SALES $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, LiBO_2 Y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ A 25°C Y LA DIFERENCIA ENTRE EL EFECTO DEL CATIÓN (FLECHA ROJA) Y EL EFECTO DEL ANIÓN (FLECHA AZUL).	67
FIGURA 5-26 GRÁFICO COMPARATIVO DE CONDUCTIVIDAD DE LAS SALES $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, LiBO_2 Y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ A 25°C Y LA DIFERENCIA ENTRE EL EFECTO DEL CATIÓN (FLECHA ROJA) Y EL EFECTO DEL ANIÓN (FLECHA AZUL).	67
FIGURA 5-27 GRÁFICO COMPARATIVO DE ACTIVIDAD DE AGUA DE LAS SALES $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, LiBO_2 Y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ A 25°C Y LA DIFERENCIA ENTRE EL EFECTO DEL CATIÓN (FLECHA ROJA) Y EL EFECTO DEL ANIÓN (FLECHA AZUL).	68
FIGURA 6-1 LÍNEAS DE EVAPORACIÓN DE TETRABORATO DE LITIO A DISTINTAS RAZONES EN EL DIAGRAMA DE FASES TERNARIO $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - LiBO_2 - H_2O .	71
FIGURA 6-2 LÍNEAS DE EVAPORACIÓN DE METABORATO DE LITIO A DISTINTAS RAZONES EN EL DIAGRAMA DE FASES TERNARIO $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - LiBO_2 - H_2O .	72

FIGURA 6-3 LÍNEAS DE EVAPORACIÓN DE TETRABORATO DE SODIO A DISTINTAS RAZONES EN EL DIAGRAMA DE FASES TERNARIO

NaCl-Na₂B₄O₇-H₂O. 74

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1 COMPARACIÓN DE LOS PRECIOS DISPONIBLES EN EL MERCADO PARA LOS COMPUESTOS DE BORO [11-14]	12
TABLA 2-1 PARÁMETROS DE PITZER DE SALES DE LITIO EN SOLUCIONES BINARIAS A 297.15 K [22].	17
TABLA 2-2 PARÁMETROS DE SALES DE LITIO EN SISTEMA TERNARIO CON AGUA [23].	17
TABLA 2-3 RECOPIACIÓN DE DATOS REFERENTES AL TETRABORATO DE LITIO Y METABORATO DE LITIO [24].	17
TABLA 2-4 COEFICIENTES DE PITZER PARA LOS SISTEMAS BINARIOS DE TETRABORATO DE LITIO Y TETRABORATO DE SODIO [25]. ..	18
TABLA 3-1 MASA DE CADA SAL NECESARIA PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.	25
TABLA 4-1 RESULTADOS DE DENSIDAD Li ₂ B ₄ O ₇ A 25°C.....	28
TABLA 4-2 RESULTADOS DE DENSIDAD Li ₂ B ₄ O ₇ A 35°C.....	29
TABLA 4-3 RESULTADOS DE DENSIDAD Li ₂ B ₄ O ₇ A 45°C.....	29
TABLA 4-4 RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD Li ₂ B ₄ O ₇ A 25°C.....	30
TABLA 4-5 RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD Li ₂ B ₄ O ₇ A 35°C.....	31
TABLA 4-6 RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD Li ₂ B ₄ O ₇ A 45°C.....	31
TABLA 4-7 RESULTADOS DE PH Li ₂ B ₄ O ₇ A 25°C.....	32
TABLA 4-8 RESULTADOS DE PH Li ₂ B ₄ O ₇ A 35°C.....	32
TABLA 4-9 RESULTADOS DE PH Li ₂ B ₄ O ₇ A 45°C.....	33
TABLA 4-10 RESULTADOS DE ACTIVIDAD DE AGUA DE Li ₂ B ₄ O ₇ A 25°C.....	34
TABLA 4-11 RESULTADOS DE DENSIDAD DE LiBO ₂ A 25°C.....	35
TABLA 4-12 RESULTADOS DE DENSIDAD DE LiBO ₂ A 35°C.....	36
TABLA 4-13 RESULTADOS DE DENSIDAD DE LiBO ₂ A 45°C.....	36
TABLA 4-14 RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD DE LiBO ₂ A 25°C.....	37
TABLA 4-15 RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD DE LiBO ₂ A 35°C.....	37
TABLA 4-16 RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD DE LiBO ₂ A 45°C.....	38
TABLA 4-17 RESULTADOS DE PH DE LiBO ₂ A 25°C.....	38
TABLA 4-18 RESULTADOS DE PH DE LiBO ₂ A 35°C.....	39
TABLA 4-19 RESULTADOS DE PH DE LiBO ₂ A 45°C.....	39
TABLA 4-20 RESULTADOS DE ACTIVIDAD DEL AGUA DE LiBO ₂ A 25°C.....	40
TABLA 4-21 RESULTADOS DE DENSIDAD DE Na ₂ B ₄ O ₇ A 25°C.....	41
TABLA 4-22 RESULTADOS DE DENSIDAD DE Na ₂ B ₄ O ₇ A 35°C.....	41
TABLA 4-23 RESULTADOS DE DENSIDAD DE Na ₂ B ₄ O ₇ A 45°C.....	42
TABLA 4-24 RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD DE Na ₂ B ₄ O ₇ A 25°C.....	42
TABLA 4-25 RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD DE Na ₂ B ₄ O ₇ A 35°C.....	43
TABLA 4-26 RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD DE Na ₂ B ₄ O ₇ A 45°C.....	43
TABLA 4-27 RESULTADOS DE PH DE Na ₂ B ₄ O ₇ A 25°C.....	44
TABLA 4-28 RESULTADOS DE PH DE Na ₂ B ₄ O ₇ A 35°C.....	44
TABLA 4-29 RESULTADOS DE PH DE Na ₂ B ₄ O ₇ A 45°C.....	45
TABLA 4-30 RESULTADOS DE ACTIVIDAD DEL DE Na ₂ B ₄ O ₇ A 25°C.....	45
TABLA 4-31 RESULTADOS DE DENSIDAD A 25°C EN EL TIEMPO DE Li ₂ B ₄ O ₇	46
TABLA 4-32 RESULTADOS DE DENSIDAD A 25°C EN EL TIEMPO DE LiBO ₂	46
TABLA 4-33 RESULTADOS DE DENSIDAD A 25°C EN EL TIEMPO DE Na ₂ B ₄ O ₇	47
TABLA 4-34 RESULTADOS DE SOLUBILIDAD EXPERIMENTALES Y OBTENIDAS DESDE LITERATURA.	49
TABLA 5-1 COMPILACIÓN DE AAD (%) DE MODELOS PROPUESTOS PARA CADA PROPIEDAD.	50
TABLA 5-2 PARÁMETROS EMPÍRICOS FISICOQUÍMICOS OBTENIDOS PARA LOS SISTEMAS Li ₂ B ₄ O ₇ -H ₂ O, LiBO ₂ -H ₂ O Y Na ₂ B ₄ O ₇ -H ₂ O A 25, 35 Y 45°C.	69
TABLA 5-3 PARÁMETROS TERMODINÁMICOS DEL MODELO DE PITZER OBTENIDOS PARA LOS SISTEMAS Li ₂ B ₄ O ₇ -H ₂ O, LiBO ₂ -H ₂ O Y Na ₂ B ₄ O ₇ -H ₂ O A 25°C.....	69
TABLA 6-1 SALMUERA IDEAL DE SISTEMA Li ₂ B ₄ O ₇ -LiBO ₂ -H ₂ O CALCULADA DEL SALAR DE ATACAMA [36].	70
TABLA 6-2 RESULTADOS DE PRECIPITACIÓN DE TETRABORATO DE LITIO.	70
TABLA 6-3 RESULTADOS DE PRECIPITACIÓN DE METABORATO DE LITIO.	72
TABLA 6-4 SALMUERA IDEAL DE SISTEMA Na ₂ B ₄ O ₇ -NaCl-H ₂ O CALCULADA DEL SALAR DE ATACAMA [36].	73
TABLA 6-5 RESULTADOS DE PRECIPITACIÓN DE TETRABORATO DE SODIO.....	73

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

Durante el 2020 se registró que el 48% de la producción mundial del Litio es proveniente de salmueras ricas en este elemento. Chile se registró como el principal productor por medio de este recurso con un 66% del total, seguido por Argentina con el 17%, de esta forma Chile produce el 32% del Litio mundial, siendo el segundo mayor productor luego de Australia que produce el 46% mundial [1].

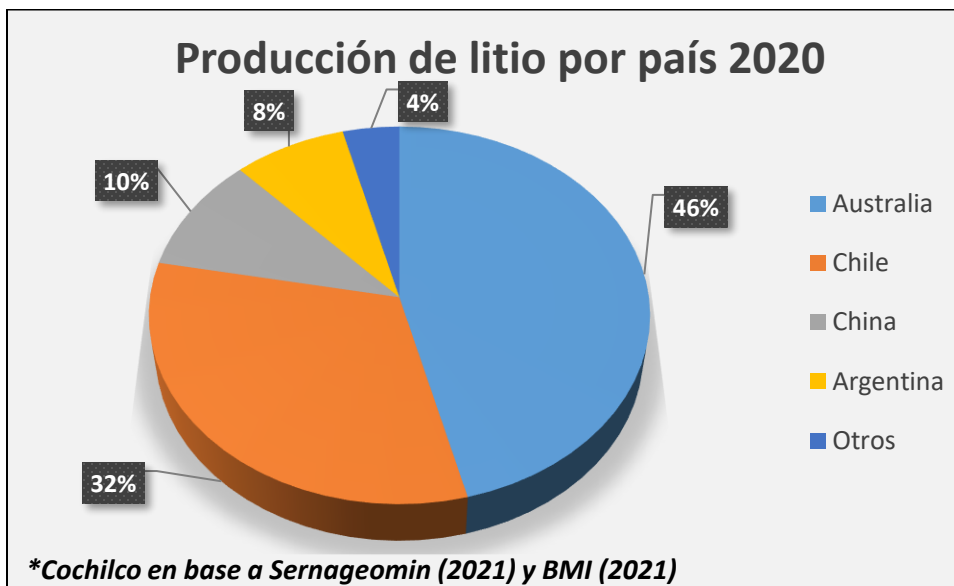


Figura 1-1 Producción de litio por país al 2020 [1].

El procesamiento de salmueras es principalmente químico, a partir de la evaporación y la precipitación de compuestos, lo que hace que esta forma de extracción requiera de pocos insumos a diferencia de su contraparte desde pegmatitas las cuales conllevan chancado, molienda entre otros tratamientos con maquinaria de alta escala [1]. Sin embargo, es por esto que el tiempo de obtención de las diferentes sales de litio es sobre los 18 meses, además del riesgo de precipitación de variados compuestos debido a las impurezas o elementos no deseados dentro de la salmuera misma, tales como el boro, el potasio, el sodio entre otros [2], de los cuales el boro representa una problemática en la producción de litio metálico al momento de realizar la electrolisis dado que se acumula como un anión no volátil que generan un rápido corto circuito en la celda [3] y del cual hay poca información termodinámica para la precipitación de sales de boro en salmueras.

La exportación de boro en Chile es principalmente como ácido bórico y óxidos de boro, con una tendencia a aumentar la cantidad en comparación a los trimestres anteriores desde el 2023 [4], como muestra la Figura 1-1. Sin embargo, el precio de estos compuestos exportados ha ido en una disminución a pesar de su mayor demanda, esto en parte debido a la creciente explotación de yacimientos de boratos en Turquía, el principal exportador boratos tanto refinados como no refinados, como

fue reportado en importaciones de Estados Unidos durante el periodo 2019-2022 (Figura 1-3), en donde además, se señala que sobre el 65% de estos compuestos son utilizados en la industria de cerámica y vidrios de alta resistencia [5]

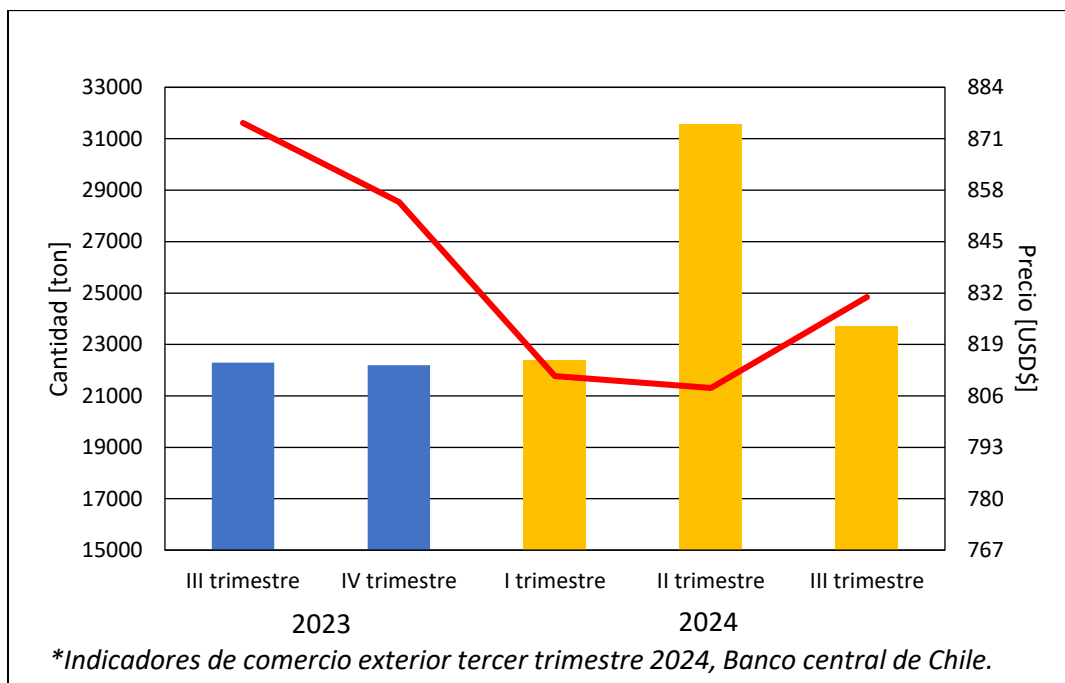


Figura 1-2 Exportaciones de Chile de ácido bórico y óxidos de boro [4].

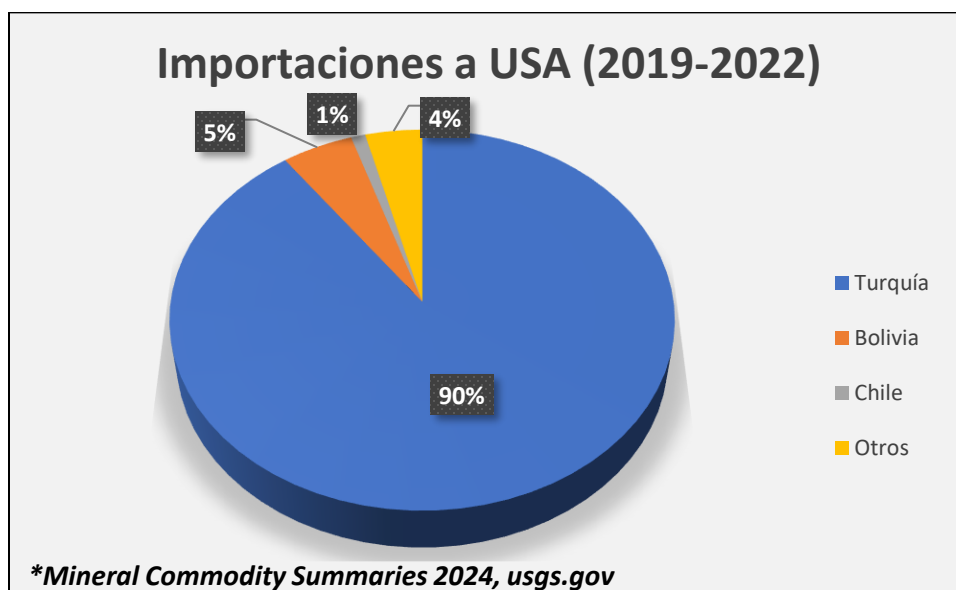


Figura 1-3 Distribución de importaciones de USA período 2019-2020 [5].

Por otro lado, algunos subproductos de valor comercial importante que son posibles obtener mediante la precipitación de estos sales son el tetraborato de litio, el cual puede ser utilizado como fundente para análisis por difracción de rayos X, absorción atómica, entre otros análisis metalúrgicos [6]. El tetraborato de sodio, que tiene,

entre otras aplicaciones, ser fundente de soldadura, vidrios, pinturas y para soluciones buffer [7] y finalmente el metaborato de litio el cual es utilizado como fundente para análisis, junto al tetraborato de litio, además de ser utilizado en la industria nuclear [8].

La precipitación deliberada de estos subproductos implica escoger los procesos adecuados para su producción, lo que requiere disponer de una base de datos termodinámicos robusta que cuente con los valores de coeficiente osmóticos y parámetros de Pitzer, los cuales han resultado útiles al momento de calcular solubilidades y condiciones de la salmuera ideales para la precipitación específica de las especies de alto valor comercial antes descritas.

Este trabajo se propone, a través de ensayos experimentales, obtener la información de propiedades termodinámicas y fisicoquímicas de sales de tetraborato de litio, tetraborato de sodio y metaborato de litio, por medio de soluciones binarias artificiales, necesaria para el modelamiento y optimización de procesos de cristalización de sales de litio en salmueras reales, además de comparar los resultados con los disponibles en la literatura.

1.2 Definición del Problema

Como fue mencionado anteriormente, la presencia del boro en la extracción del litio puede generar corto circuitos en el proceso de electrólisis [3], por lo que es removido previamente mediante un proceso de extracción por solventes, donde finalmente es obtenido como ácido bórico [9].

Si bien la exportación de ácido bórico y los óxidos de boro tuvieron un aumento del 23.5% del 2020 al 2021, lo que va acompañado de un aumento particular de exportación desde Chile de un 7.32% [10], la posibilidad de precipitar compuestos de boro de un mayor valor económico, tal como se muestra en la

Tabla 1-1, genera la necesidad de estudiar el comportamiento de estos compuestos para la recuperación previa al proceso normal de extracción de litio a partir de estas salmueras, lo que generaría una mayor rentabilidad a los proyectos en la industria minera chilena.

La comprensión termodinámica de los sistemas más simples para luego complejizarlos con adiciones de otros elementos genera una visión general más exacta y, por lo tanto, la posibilidad de crear estos nuevos procesos productivos viables. Por esto el estudio de las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de estos sistemas binarios es de suma importancia para una correcta relación de todas las posibles sales formadas en las salmueras, y así finalmente, poder generar un proceso real y eficiente en la explotación de recursos naturales.

Tabla 1-1 Comparación de los precios disponibles en el mercado para los compuestos de boro [11-14]

Compuesto	USD[\$]	Cantidad [g]	USD/g [\$g]	% Pureza	% Aumento de precio respecto al ácido bórico
H ₃ BO ₃	62,1	500	0,1242	99,500	NA
LiBO ₂	51,1	10	5,11	99,995	4014%
Li ₂ B ₄ O ₇	239	100	2,39	99,995	1824%
Na ₂ B ₄ O ₇	261	100	2,61	99,998	2001%

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar experimentalmente y modelar las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de los sistemas Li₂B₄O₇ + H₂O, Na₂B₄O₇ + H₂O y LiBO₂ + H₂O a 25, 35 y 45°C.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar datos de propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de los sistemas Li₂B₄O₇ + H₂O, Na₂B₄O₇ + H₂O y LiBO₂ + H₂O reportados en literatura para la generación de una base de datos.
- Determinar experimentalmente las propiedades de actividad del agua, pH, densidad y conductividad de los sistemas Li₂B₄O₇ + H₂O, Na₂B₄O₇ + H₂O y LiBO₂ + H₂O a 25, 35 y 45°C.
- Analizar las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de los sistemas Li₂B₄O₇ + H₂O, Na₂B₄O₇ + H₂O y LiBO₂ + H₂O a 25, 35 y 45°C mediante modelos empíricos y semi-empíricos.
- Aplicar los datos y modelaciones obtenidas para proponer un diseño conceptual de un proceso de cristalización para los sistemas en estudio.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Revisión de modelo termodinámico de Pitzer

El modelo de Pitzer para soluciones comienza con la energía libre de Gibbs de mezcla a partir de estados estándar [15] dada por:

$$\Delta_{mix}G = n_w(\mu_w - \mu_w^0) + \sum n_i(\mu_i - \mu_i^0) = RT(n_w \ln a_w + \sum n_i \ln a_i) \quad (1)$$

Desde donde se utilizan las siguientes equivalencias:

$$a_i = m_i \gamma_i \quad (2)$$

$$\varphi = -\left(\frac{\Omega}{\sum m_i}\right) \ln a_w \quad (3)$$

Donde Ω corresponde al número de moles de solvente en un kilogramo y φ corresponde al coeficiente osmótico. Es entonces donde con el uso de las ecuaciones (2) y (3), se obtiene que:

$$\Delta_{mix}G = RT \sum n_i [-\varphi + \ln(m_i \gamma_i)] \quad (4)$$

En donde se separa la expresión en dos. La primera parte independiente del coeficiente de actividad o del coeficiente osmótico, que denota la dependencia primaria de la energía de Gibbs en la composición de la solución y una segunda parte para términos “correctivos”, la cual es referida como una cantidad en exceso, para la cual se define [15]:

$$G^{ex} = \Delta_{mix}G + RT \sum n_i (1 - \ln m_i) \quad (5)$$

Entonces la ecuación (4) quedaría como:

$$G^{ex} = \Delta_{mix}G + RT \sum n_i (1 - \varphi + \ln \gamma_i) \quad (6)$$

Donde la diferenciabilidad con respecto a los moles de agua no resultará en el coeficiente de actividad del agua, si no en una expresión dependiente del coeficiente osmótico, sin embargo, la derivada parcial con respecto a los moles del ion i resulta directamente en el coeficiente de actividad molal γ_i [16]. Los coeficientes de actividades no son iguales a las derivadas parciales molares de la energía Gibbs de exceso, es por esto que Pitzer utiliza una expresión analítica de la energía libre de exceso:

$$\begin{aligned} \frac{G^{ex}}{RT} = & n_w M_w f(I) + n_w M_w \sum_i \sum_j m_i m_j \lambda_{ij}(I) \\ & + n_w M_w \sum_i \sum_j \sum_k m_i m_j m_k \mu_{ijk} + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

Donde $f(I)$ es una modificación empírica de la función de Debye-Hückel de exceso, llamado término Pitzer-Debye-Huckel, definido como:

$$f(I) = -\frac{4}{3} A \frac{I}{b} \ln(1 + b\sqrt{I}) \quad (8)$$

En la ecuación (8), el parámetro $b = 1.2$. A es el parámetro Debye-Hückel, los demás términos son empíricos de expansión virial de la molalidad, mientras que el segundo (λ_{ij}) es función de la fuerza iónica. El tercer coeficiente virial μ_{ijk} , es un parámetro de interacción de corto alcance entre tripletes de iones.

De esta forma, el modelo culmina con las ecuaciones de Pitzer de la forma [17]:

$$\ln \gamma_{\pm} = |z_M z_X| f^{\gamma} + \left(\frac{2v_M v_X}{v} \right) B^{\gamma} m + \left(\frac{2(v_M v_X)^{\frac{3}{2}}}{v} \right) C^{\gamma} m^2 \quad (9)$$

Donde:

$$f^{\gamma} = -A_{\varphi} \left[\frac{I^{\frac{1}{2}}}{1 + bI^{\frac{1}{2}}} + \frac{2}{b} \ln \left(1 + bI^{\frac{1}{2}} \right) \right] \quad (10)$$

$$B^{\gamma} = 2\beta^{(0)} + \frac{2\beta^{(1)}}{I\alpha} \left[1 - \exp \left(-\alpha I^{\frac{1}{2}} \right) \left(1 + \alpha I^{\frac{1}{2}} - \frac{\alpha^2 I}{2} \right) \right] \quad (11)$$

$$C^{\gamma} = \frac{3}{2} C^{\varphi} = 3|z_M z_X|^{\frac{1}{2}} C_{MX} \quad (12)$$

Como se observa en estas ecuaciones los parámetros de Pitzer son $\beta^{(0)}$, $\beta^{(1)}$ y $C^{(\varphi)}$ los cuales son dependientes de la temperatura. Mientras que el parámetro b tiene un valor de 1.2, el parámetro α equivale a 2 para todos los electrolitos, salvo aquellos de tipo 2:2 y el parámetro A_{φ} corresponde a la constante de Debye-Huckel la cual es dependiente de la temperatura y se puede definir en su forma en función de esta, como muestra la ecuación (13) [18].

$$A_{\varphi} = \frac{1}{3} \sqrt{2\pi d N_0} \left[\frac{e^2}{4\pi E_0 \epsilon k T} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

El valor I , de la ecuación (11), corresponde al valor de la fuerza iónica la cual está dada de la siguiente forma:

$$I = \frac{1}{2} \sum m_i Z_i^2 \quad (14)$$

Además, a partir de este planteamiento de Pitzer [19], se presentan las ecuaciones del coeficiente osmótico para las soluciones con electrolitos de uno o ambos iones univalentes, tal como son las sales por estudiar.

$$\varphi - 1 = |z_M z_X| f^{\varphi} + m \left(\frac{2v_M v_X}{v} \right) B^{\varphi} + \frac{m^2 (2v_M v_X)^{\frac{3}{2}}}{v} C^{\varphi} \quad (15)$$

Donde:

$$B^{\varphi} = \beta^{(0)} + \beta^{(1)} e^{-\alpha I^{1/2}} \quad (16)$$

$$f^{\varphi} = -A_{\varphi} \frac{I^{\frac{1}{2}}}{1 + b I^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

Y finalmente la relación entre el coeficiente osmótico y la actividad del agua del sistema:

$$\varphi = - \left(\frac{1000}{v m M_{H_2O}} \right) a_w \quad (18)$$

Mediante el cálculo de los valores conocidos y de las propiedades en estas ecuaciones es posible graficar la actividad de agua con la concentración molal de la solución, desde donde se desprende los valores de los coeficientes de Pitzer, los cuales se utilizan para ajustar el modelo al comportamiento visto. De esta manera es posible predecir a lo largo de variadas concentraciones el comportamiento de una solución que contenga estas sales electrolíticas, como su punto de solubilidad bajo ciertas condiciones, o en un trabajo posterior, combinar estas sales y utilizar los parámetros obtenidos, para obtener los parámetros de interacción de estas sales.

2.2 Revisión de modelos de empíricos

A diferencia de los modelos termodinámicos los cuales tienen su base en la termodinámica, lo que los hace semi-empíricos, los modelos empíricos se ajustan al comportamiento de la sustancia a modelar.

Tal es el caso del modelo presentado por Guo y colaboradores [20], en donde se utiliza el siguiente modelo:

$$\ln\left(\frac{d}{d_0}\right) = \sum A_i * w_i \quad (19)$$

Donde d y d_0 representan la densidad de la solución y del agua pura a una misma temperatura, respectivamente. Siendo w_i la fracción másica del electrolito en solución y A_i el índice de densidad del electrolito en la solución.

Por otro lado, Claros y colaboradores [21] presenta un modelo empírico llamado la regla de Othmer, cuya correlación de variables considera los efectos de la temperatura y la concentración, esta expresión es utilizada en el trabajo tanto para la densidad, la viscosidad dinámica y el índice de refracción:

$$\ln(Y_R) = \ln\left(\frac{Y}{Y_w}\right) = A + B \ln(Y_w) \quad (20)$$

Donde A y B corresponden a la multiplicación de un parámetro de ajuste A_1 por la fracción másica del componente, y un parámetro de ajuste B_1 por la misma fracción másica, correspondientemente.

Además, presenta los modelos empíricos para las propiedades de conductividad y pH:

$$k = E_1 + E_2 c + E_3 c^2 \quad (21)$$

$$pH = \frac{P_1}{T} + P_2 w_1^{0.5} + P_3 w_2^{0.5} \quad (22)$$

Donde en la ecuación (21) E_1 , E_2 y E_3 , son parámetros de ajuste, mientras que c corresponde a la concentración molar de la solución. Para la ecuación (22), P_1 , P_2 y P_3 son parámetros de ajustes, mientras que T corresponde a la temperatura en Kelvin y w_1 y w_2 , representan la fracción másica del componente en el sistema.

2.3 Antecedentes

Con anterioridad los diversos autores han realizado estudios sobre boratos presentes en soluciones ricas en litio, en donde se encuentran sales de boratos disueltas. Tal es el caso mencionado por Meng [22], donde se compilan los coeficientes de Pitzer de sales de litio, donde se encuentra, entre ellas, el tetraborato de litio, como muestra la Tabla 2-1, a la temperatura de 298.15 K, el cual también ha sido citado por Yang [23], el cual además agrega parámetros de Pitzer del

metaborato de litio, como se muestra en la Tabla 2-2, o el caso de Wang [24], donde se recopilan los trabajos realizados con anterioridad, enfocados al ácido bórico y otros boratos, como se muestra en la Tabla 2-3, donde además menciona el rango de concentración, las diversas temperaturas estudiadas y el tipo de estudio, siendo la mayoría sobre solubilidades.

Tabla 2-1 Parámetros de Pitzer de sales de litio en soluciones binarias a 297.15 K [22].

Especie	β^0	β^1	C^ϕ
LiCl	0.20818	-0.07264	-0.004241
Li ₂ SO ₄	0.14396	1.17736	-0.00571
Li ₂ (B ₄ O ₅)(OH) ₄	-0.331042	-0.152813	0.01012

Tabla 2-2 Parámetros de sales de litio en sistema ternario con agua [23].

Parámetro	T [K]	β^0	β^1	C^ϕ
LiB(OH) ₄	298.15	-0.03611	6.137156	-0.123764
Li ₂ B ₄ O ₇ (OH) ₄	298.15	-0.331042	-0.152813	0.010120

Tabla 2-3 Recopilación de datos referentes al tetraborato de litio y metaborato de litio [24].

Sistema	Tipo de estudio	T [K]	P [atm]	Rango de concentración
Li ₂ B ₄ O ₇ + H ₂ O	Solubilidad	273-373	1	m _s
	ϕ , solubilidad	298	P _{sat}	m _{Li₂B₄O₇} =0.027~ms
	Solubilidad	288	1	m _s
	Punto de fusión	271-273	1	m _{Li₂B₄O₇} =0.03~0.023
LiBO ₂ + H ₂ O	Solubilidad	273-374	1	m _s
	Solubilidad	272-298	1	m _s

Por otro lado, algunos autores han calculado los parámetros de Pitzer binarios del tetraborato de litio y tetraborato de sodio, de sistemas ternarios con adiciones de cloruros de litio, bajo el supuesto de que los iones de boratos presentes corresponden sólo al ion borato presente en la sal inicial [25] y no otras especies, es decir, como si la sal de cloruro adicionada a cada sistema no tuviera un efecto en el ajuste al modelo binario, obteniendo resultados positivos entre lo calculado mediante el modelo ajustado y el resultado experimental que obtuvieron.

Tabla 2-4 Coeficientes de Pitzer para los sistemas binarios de tetraborato de litio y tetraborato de sodio [25].

Especie	T [K]	β^0	β^1	C^ϕ
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4$	298.15	0.945109	2.751490	-2.438304
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4$	323.15	-0.377726	0.987636	-2.847632
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4$	298.15	1.567121	0.509412	-8.016511
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4$	323.15	0.135669	-1.481315	-0.329720

La variabilidad de los parámetros entre sí es debido a que son ajustados a partir de relaciones termodinámicas de sistemas complejos con la utilización de los parámetros de mezcla θ y Ψ , y suposiciones convenientes para el análisis y ajuste de estos.

Además, en el trabajo de Guo [26] realiza comparaciones de densidades de soluciones acuosas de tetraborato de litio de la literatura y experimentales, obteniendo así una ampliación del perfil de densidad a distintas concentraciones de esta sal, como muestra la Figura 2-1.

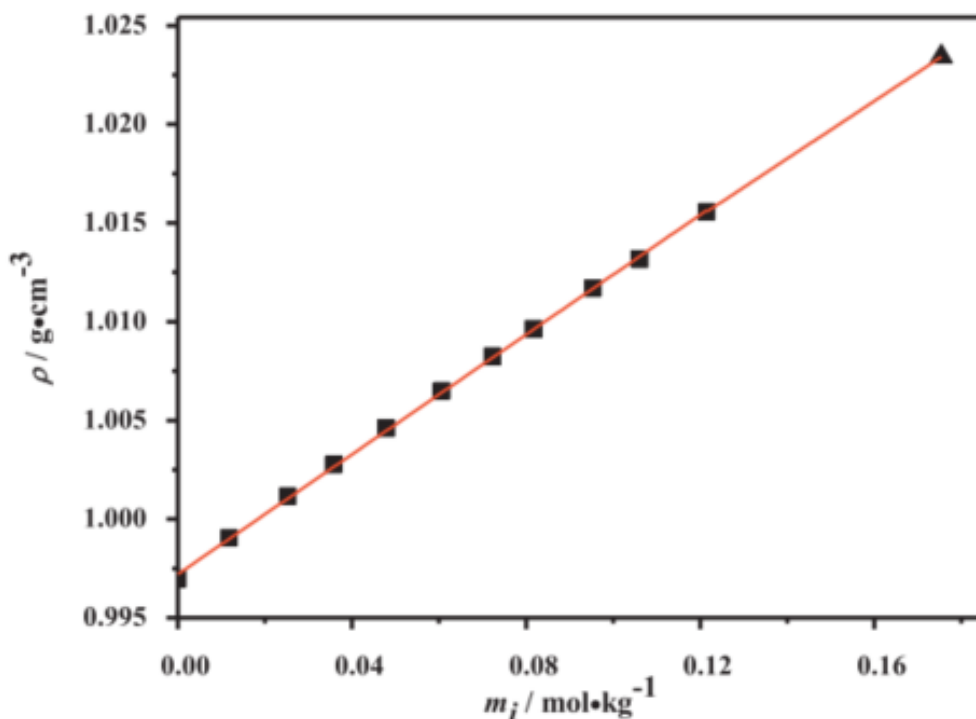


Figura 2-1 Comparación de densidad del sistema $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7+\text{H}_2\text{O}$ entre la literatura (triángulo) y experimental (cuadrados) [26]

Finalmente, variados autores y proveedores han reportado la solubilidad de saturación de cada sal en el sistema con agua [12-14], [27-29].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Descripción de materiales e insumos

3.1.1 Tetraborato de litio

Sal electrolítica de color blanco, de alta pureza (>98.0%)(Anexo 1) de peso molecular 169.12 [g/mol], obtenida de laboratorios Merck (Figura 3-1).



Figura 3-1 Tetraborato de litio de alta pureza.

3.1.2 Tetraborato de sodio

Sal electrolítica de color blanco, de alta pureza (>98.0%)(Anexo 2) de peso molecular 201.22 [g/mol], obtenida de laboratorios Merck (Figura 3-2).



Figura 3-2 Tetraborato de sodio de alta pureza.

3.1.3 Metaborato de litio

Sal electrolítica de color blanco, de alta pureza (>98.0%)(Anexo 3) de peso molecular 49.75 [g/mol], obtenida de laboratorios Merck (Figura 3-3).



Figura 3-3 Metaborato de litio de alta pureza

3.2 Descripción de equipos

3.2.1 Densímetro digital

El densímetro digital ANTON PAAR DMA1001 (Figura 3-4) se utiliza para la medición de densidades de distintas soluciones, por medio de la inyección desde jeringas desechables de un promedio de 2 [ml] de muestra, con un mínimo de 1 [ml], en el cual se pueden realizar múltiples mediciones con la misma muestra. Tiene un rango de temperatura de trabajo entre 15 a 60°C, un rango de medición de densidad de 0 a 3 [g/cm³] con una resolución de densidad de 0.00001 [g/cm], por lo que se obtienen resultados confiables y de buena calidad, con una reproducibilidad de 0.00007 [g/cm³] y es calibrado a diario mediante su programa incorporado de calibración con la utilización de agua destilada.



Figura 3-4 Densímetro digital ANTON PAAR DMA1001[30]

3.2.2 Medidor de laboratorio de mesa

El medidor de laboratorio de sobremesa RI5522 (Figura 3-5) tiene la opción de realizar las mediciones de pH y de conductividad, dependiendo del terminal conectado al equipo. Para la realización de medición de pH, se utiliza el electrodo

de pH el que, tiene incorporado un medidor de temperatura, con un rango de medición de -2.000 a 20.000 pH y -20. A 120.0 °C, con una resolución de 0.001 pH y 0.1 °C. La calibración para la medición de pH se puede realizar hasta en cinco puntos estándares, para mediciones de amplio espectro y de tres puntos para la temperatura (0, 50 y 100 °C).

Para la medición de conductividad se conecta una sonda de conductividad la cual puede realizar mediciones desde 0.000 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 9.999 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. Se puede aumentar el rango en un orden de magnitud, eliminando una cifra decimal, hasta llegar al rango de medición de 100.0 [mS/cm] a 1000.0 [mS/cm], con una resolución de 0.001 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. La calibración es realizada con hasta 4 soluciones estándares para mayor precisión.



Figura 3-5 Medidor de Laboratorio de sobremesa HANNA INSTRUMENTS RI5522 [31], [32]

3.2.3 Baño de recirculación

La utilización del baño de recirculación (Figura 3-6), es para realizar mediciones en el medidor de sobremesa a distintas temperaturas, permitiendo mantener el recipiente que contiene la solución a una temperatura constante durante la medición. Tiene un rango de temperatura de -20 a 100°C, con una resolución en pantalla de 0.1 °C y una estabilidad de temperatura de 0.05°C. Contiene agua en un tanque interno el cual es revisado y mantenido por el personal del laboratorio.



Figura 3-6 Baño de recirculación SCIENTZ-BIO, modelo DC-1006 [33].

3.2.4 Incubadora de hibridación

La incubadora de hibridación (Figura 3-7), es utilizada para mantener las soluciones realizadas a una temperatura y una homogeneización ideal durante un tiempo prolongado. Tiene un rango de temperatura desde 5 a 80°C, con una precisión de 0.2°C, una velocidad de rotación de 7 a 40 rpm y una capacidad de 12 tubos cónicos de muestra de 50 [ml] cada uno.



Figura 3-7 Incubadora de Hibridación COMBI-H12 [34]

3.2.5 Medidor de actividad de agua

El equipo de medición de actividad de agua Novasina LabMaster-aw neo (Figura 3-8), es utilizado para la obtención del parámetro termodinámico de la actividad de agua. Tiene un rango de temperatura de trabajo de 0 a 60°C, con un rango de medición de actividad de agua desde 0.0300 a 1.000 y una resolución de 0.0001.



Figura 3-8 Equipo de medición de actividad de agua Novasina LabMaster-aw neo [35].

3.2.6 Balanza analítica

La balanza analítica Veto A6709120 (Figura 3-9), tiene una resolución de 0.0001 [g] y una capacidad máxima de 110 [g]. Cuenta con una cámara cerrada de dimensiones 203 x 458 x 300 [mm].



Figura 3-9 Balanza analítica Veto A6709120

3.3 Procedimiento experimental

3.3.1 Preparación de las muestras

Con los insumos señalados anteriormente de sales de tetraborato de sodio, tetraborato de litio y metaborato de sodio, en laboratorio se realizaron 13 soluciones sintéticas a distinta concentración molar, por cada sal, generando un total de 39

soluciones de las cuales se obtendrán muestras adecuadas para cada experimento, siendo estos la medición de pH, conductividad, densidad y actividad del agua.

Para la realización de la medición de densidad con el densímetro digital, es necesario 2 [ml] de muestra con un mínimo posible de 1 [ml], para el cual se considerarán experimentos en triplicado. Además de realizarse a tres temperaturas distintas, por lo que al menos 18 [ml] de solución son necesarios. Por otro lado, para la medición de conductividad y pH, es posible usar una misma muestra para la realización de medición a distintas temperaturas debido a que los terminales de pH y conductividad no consumen la solución ni la alteran de ninguna forma. Por lo cual, es necesario un triplicado para verificar reproducibilidad de resultados. Se utilizarán muestras de 50 [ml] en vasos de reacción enchaquetados, los cuales estarán en el sistema de regulación de temperatura por un baño de recirculación dispuesto. El cual puede operar a las temperaturas seleccionadas de 25, 35 y 45 °C, para la misma muestra en distintos tiempos y que posteriormente será recuperada para las demás mediciones. Finalmente, para la medición de la actividad del agua, se requiere un volumen de 8 [ml] para la medición, donde el equipo es capaz de realizar las mediciones a temperaturas de hasta 60°C. Será necesaria una muestra fresca del volumen señalado para cada medición, por lo que, para obtener todos datos necesarios para la posterior modelación, se requieren al menos 72 [mL] de solución. Por esto se prepararán un volumen aproximado de 100 [ml] de cada solución a estudiar.

Se prepararán las muestras con una base de 100 [g] de agua, el cual será cuidadosamente pesado a temperatura ambiente para obtener el gramaje exacto y el volumen correspondiente a temperatura ambiente. Luego, se agrega la cantidad de sal correspondiente según se muestra en la

Tabla 3-1, correspondientes al 8% de la solubilidad de saturación en agua de cada sal [27-29] en aumento, hasta llegar a una concentración de saturación.

Tabla 3-1 Masa de cada sal necesaria para la preparación de las muestras.

Sal	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	LiBO_2	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	% del límite soluble
PM [g/mol]	169,12	49,75	201,22	-
Solubilidad en agua [g/l]	29,97 [29]	25,7 [27]	31,7 [28]	-
Masa de agua [g]	100	100	100	-
M1 [g]	0,2398	0,2056	0,2536	8
M2 [g]	0,4795	0,4112	0,5072	16
M3 [g]	0,7193	0,6168	0,7608	24
M4 [g]	0,9890	0,8224	1,0144	32
M5 [g]	1,1988	1,0280	1,2680	40
M6 [g]	1,4386	1,2336	1,5216	48
M7 [g]	1,6783	1,4392	1,7752	56
M8 [g]	1,9181	1,6448	2,0288	64
M9 [g]	2,1578	1,8504	2,2824	72
M10 [g]	2,3976	2,0560	2,5360	80
M11 [g]	2,6374	2,2616	2,7896	88
M12 [g]	2,8771	2,4672	3,0432	96
M13 [g]	2,9970	2,5700	3,1700	100
140% Saturación	4,1958	3,5980	4,4380	140

Debido al gran volumen de recipientes necesarios para llevar a cabo las mediciones y a fin de evitar errores de manejo de muestras, sólo se trabajará con una sal para preparar sus trece muestras y llevar a cabo las mediciones propuestas. Las muestras serán analizadas por medio de fluorescencia de rayos X para obtener el dato preciso de las concentraciones de estas. Una vez obtenidos los datos y confirmado en duplicado o triplicado, según corresponda, se comenzará el trabajo con la sal siguiente. Las muestras serán almacenadas en la incubadora a 25°C durante al menos una semana, hasta que la solución sea clara y homogénea, sin residuos de sal visible.

Las mediciones de densidad se realizarán adicionando 2 [mL] de solución fresca al densímetro en triplicado, los cuales serán recuperados gracias al lavado y secado previo a cada cambio de muestra. Las mediciones se realizarán a 25°C, la misma temperatura a la cual están almacenadas las muestras en la incubadora, para reducir el tiempo de calentamiento de la celda del medidor de densidad. Posteriormente, se almacenarán en la incubadora todas las muestras a 35°C, para continuar las mediciones a esta temperatura en el medidor de densidad,

nuevamente disminuyendo el tiempo de calentamiento de la celda. El mismo proceso se repetirá para las mediciones a 45°C.

Paralelamente, se realizarán las mediciones de conductividad, vertiendo 50 [mL] de solución en un vaso enchaquetado conectado al baño de recirculación para mantener la temperatura de la muestra, adicionando un imán con el cual se realizará una agitación previa a la toma de datos. Se realizará la medición para una muestra, luego es agitada por al menos 10 segundos, para realizar la segunda medición y se repite el proceso para la tercera medición. Las mediciones se realizarán a la misma temperatura que las mediciones de densidad, aprovechando la temperatura de la muestra obtenida en la incubadora, disminuyendo el tiempo de calentamiento en el vaso enchaquetado. La muestra es recuperada luego de su medición, el vaso enchaquetado es lavado con agua desionizada y posteriormente secada para verter la nueva muestra a medir.

La medición de pH se realiza en conjunto con la medición de conductividad gracias a la posibilidad de mantener dos electrodos de medición en el medidor de laboratorio Hannah Instruments.

Por último, las mediciones de actividad de agua se realizarán siguiendo el método definido como más adecuado mediante pruebas previas con el equipo, manteniendo la muestra en constante agitación, para luego extraer 8 [mL] de esta, necesarias para el análisis del equipo, siendo finalmente descartada o separada a un recipiente aparte.

Además, se realizará una muestra sobresaturada respecto al valor seleccionado desde la literatura, para realizar pruebas de solubilidad de todas las sales a 25°C, mediante la medición de densidad, hasta que sea constante, para luego realizar un análisis de absorción atómica y así, reportar el tiempo de equilibrio y límite soluble obtenido.

3.4 Análisis de resultados

Una vez realizadas las mediciones, serán compiladas en tablas de Excel para su posterior procesamiento.

La modelación termodinámica se realizará una vez obtenidos los parámetros de Pitzer descritos en las ecuaciones (10), (11) y (12); y para esto se realizarán los cálculos a partir del coeficiente osmótico con la ecuación (15)(18), a partir de la cual se obtendrá una actividad de agua calculada por el modelo, según la ecuación (18). Obtenidos los parámetros se comparará con los parámetros encontrados en literatura, para comparar los resultados según los supuestos aplicados a cada trabajo.

Para la modelación de densidad se utilizarán los dos modelos propuestos, dados por las ecuaciones (19) y (20) y se calculará la diferencia entre ambos y respecto a lo obtenido experimentalmente.

Para la modelación de conductividad y pH se utilizarán los modelos representados por las ecuaciones (21) y (22).

Todos los parámetros serán ajustados mediante la minimización de la ecuación de errores promedios cuadrados:

$$MSE = \frac{\sum_i^n (Exp_i - Calc_i)^2}{n} \quad (23)$$

3.5 Diseño de precipitación

Para el diseño del modelo de precipitación se utilizarán los diagramas de fases postulados por Yang [23] para las sales de litio y Yang [25] para la sal de sodio, en donde a partir dos salmueras propuestas con concentraciones del Salar de Atacama [36] considerando los elementos relevantes para este estudio (Li, Na, B y O), se analizará el proceso de secado directo de la salmuera, con adiciones de la sal anhidra específica a la salmuera propuesta, estudiando la evolución de la recta de secado y la modificación de su pendiente con estas adiciones, y qué especie será la que precipite, además de la recuperación, la cual será definida como:

$$\%Recuperación\ Neta = \frac{MAP - MAA}{MAI} \quad (24)$$

Donde MAP es la masa anhidra de la sal precipitada, MAA la masa anhidra agregada al sistema y MAI es la masa anhidra de la salmuera inicial.

3.6 Carta Gantt

Se presenta la carta Gantt del proyecto con los hitos relevantes, donde la línea celeste representa la recepción del reactivo metaborato de litio y donde la línea morada representa la recepción del reactivo tetraborato de sodio en el Anexo 4. Además, los rombos rojos representan las defensas del proyecto, privada durante la primera semana de diciembre y pública durante la segunda semana del mismo mes en el Anexo 5.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Tetraborato de Litio

4.1.1 Medición de densidad

Se presentan las mediciones de densidad de las 13 muestras a 25°C (Tabla 4-1), 35°C (Tabla 4-2) y a 45°C (Tabla 4-3), con su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 4-1 Resultados de densidad $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [g/cm³]	Medición 2 [g/cm³]	Medición 3 [g/cm³]	Promedio	Desviación estándar
1	0,002392	0,99875	0,99875	0,99882	0,99877	4,041,E-05
2	0,004772	1,00038	1,00040	1,00035	1,00038	2,517,E-05
3	0,007141	1,00226	1,00228	1,00232	1,00229	3,055,E-05
4	0,009499	1,00379	1,00382	1,00382	1,00381	1,732,E-05
5	0,011846	1,00553	1,00554	1,00553	1,00553	5,774,E-06
6	0,014182	1,00715	1,00710	1,00706	1,00710	4,509,E-05
7	0,016506	1,00871	1,00871	1,00867	1,00870	2,309,E-05
8	0,018820	1,01023	1,01024	1,01018	1,01022	3,215,E-05
9	0,021123	1,01178	1,01180	1,01183	1,01180	2,517,E-05
10	0,023415	1,01333	1,01327	1,01330	1,01330	3,000,E-05
11	0,025696	1,01474	1,01472	1,01478	1,01475	3,055,E-05
12	0,027967	1,01623	1,01627	1,01632	1,01627	4,509,E-05
13	0,029098	1,01706	1,01702	1,01710	1,01706	4,000,E-05

Tabla 4-2 Resultados de densidad $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 35°C

Temperatura	35°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [g/cm³]	Medición 2 [g/cm³]	Medición 3 [g/cm³]	Promedio	Desviación estándar
1	0,002392	0,99514	0,99578	0,99580	0,99557	3,754,E-04
2	0,004772	0,99730	0,99732	0,99732	0,99731	1,155,E-05
3	0,007141	0,99917	0,99920	0,99921	0,99919	2,082,E-05
4	0,009499	1,00065	1,00063	1,00069	1,00066	3,055,E-05
5	0,011846	1,00249	1,00246	1,00245	1,00247	2,082,E-05
6	0,014182	1,00393	1,00395	1,00401	1,00396	4,163,E-05
7	0,016506	1,00547	1,00555	1,00558	1,00553	5,686,E-05
8	0,018820	1,00705	1,00705	1,00707	1,00706	1,155,E-05
9	0,021123	1,00863	1,00870	1,00870	1,00868	4,041,E-05
10	0,023415	1,01019	1,01021	1,01022	1,01021	1,528,E-05
11	0,025696	1,01176	1,01172	1,01173	1,01174	2,082,E-05
12	0,027967	1,01326	1,01328	1,01328	1,01327	1,155,E-05
13	0,029098	1,01394	1,01398	1,01402	1,01398	4,000,E-05

Tabla 4-3 Resultados de densidad $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 45°C

Temperatura	45°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [g/cm³]	Medición 2 [g/cm³]	Medición 3 [g/cm³]	Promedio	Desviación estándar
1	0,002392	0,99209	0,99183	0,99250	0,99214	3,378,E-04
2	0,004772	0,99369	0,99371	0,99369	0,99370	1,155,E-05
3	0,007141	0,99536	0,99540	0,99543	0,99540	3,512,E-05
4	0,009499	0,99681	0,99689	0,99694	0,99688	6,557,E-05
5	0,011846	0,99854	0,99866	0,99856	0,99859	6,429,E-05
6	0,014182	1,00006	1,00014	1,00016	1,00012	5,292,E-05
7	0,016506	1,00172	1,00179	1,00169	1,00173	5,132,E-05
8	0,018820	1,00314	1,00322	1,00320	1,00319	4,163,E-05
9	0,021123	1,00473	1,00481	1,00477	1,00477	4,000,E-05
10	0,023415	1,00642	1,00638	1,00637	1,00639	2,646,E-05
11	0,025696	1,00778	1,00780	1,00776	1,00778	2,000,E-05
12	0,027967	1,00926	1,00934	1,00933	1,00931	4,359,E-05
13	0,029098	1,01010	1,01014	1,01007	1,01010	3,512,E-05

4.1.2 Medición de conductividad

Se presentan las mediciones de conductividad de las 13 muestras a 25°C (Tabla 4-4), 35°C (Tabla 4-5) y a 45°C (Tabla 4-6), con su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 4-4 Resultados de conductividad $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [mS/cm]	Medición 2 [mS/cm]	Medición 3 [mS/cm]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00239	1,367	1,360	1,366	1,364	0,004
2	0,00477	2,694	2,707	2,706	2,702	0,007
3	0,00714	3,239	3,236	3,239	3,238	0,002
4	0,00950	3,555	3,530	3,559	3,548	0,016
5	0,01185	4,341	4,338	4,339	4,339	0,002
6	0,01418	5,000	5,034	4,943	4,992	0,046
7	0,01651	5,692	5,685	5,703	5,693	0,009
8	0,01882	6,189	6,215	6,229	6,211	0,020
9	0,02112	6,841	6,873	6,918	6,877	0,039
10	0,02341	7,382	7,487	7,465	7,445	0,055
11	0,02570	7,946	8,019	8,050	8,005	0,053
12	0,02797	8,529	8,603	8,609	8,580	0,045
13	0,02910	8,871	8,889	8,868	8,876	0,011

Tabla 4-5 Resultados de conductividad $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 35°C

Temperatura	35°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [mS/cm]	Medición 2 [mS/cm]	Medición 3 [mS/cm]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00239	1,198	1,173	1,199	1,190	0,015
2	0,00477	2,260	2,247	2,258	2,255	0,007
3	0,00714	3,284	3,282	3,261	3,276	0,013
4	0,00950	4,120	4,202	4,235	4,186	0,059
5	0,01185	5,303	5,297	5,292	5,297	0,006
6	0,01418	5,937	5,978	5,980	5,965	0,024
7	0,01651	7,313	7,356	7,336	7,335	0,022
8	0,01882	8,192	8,157	8,210	8,186	0,027
9	0,02112	9,225	9,162	9,108	9,165	0,059
10	0,02341	9,830	9,800	9,815	9,815	0,015
11	0,02570	10,680	10,660	10,630	10,657	0,025
12	0,02797	11,370	11,320	11,360	11,350	0,026
13	0,02910	11,700	11,600	11,650	11,650	0,050

Tabla 4-6 Resultados de conductividad $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 45°C

Temperatura	45°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [mS/cm]	Medición 2 [mS/cm]	Medición 3 [mS/cm]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00239	1,296	1,308	1,308	1,304	0,007
2	0,00477	2,452	2,454	2,451	2,452	0,002
3	0,00714	3,500	3,514	3,516	3,510	0,009
4	0,00950	4,372	4,437	4,456	4,422	0,044
5	0,01185	5,718	5,732	5,756	5,735	0,019
6	0,01418	6,418	6,428	6,483	6,443	0,035
7	0,01651	7,850	7,854	7,843	7,849	0,006
8	0,01882	8,853	8,823	8,849	8,842	0,016
9	0,02112	9,812	9,790	9,808	9,803	0,012
10	0,02341	10,510	10,470	10,490	10,490	0,020
11	0,02570	11,070	11,120	11,100	11,097	0,025
12	0,02797	11,940	11,870	11,910	11,907	0,035

4.1.3 Medición de pH

Se presentan las mediciones de pH de las 13 muestras a 25°C (Tabla 4-7), 35°C (Tabla 4-8) y a 45°C (Tabla 4-9), con su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 4-7 Resultados de pH $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00239	9,21	9,21	9,17	9,20	0,023
2	0,00477	9,17	9,17	9,18	9,17	0,006
3	0,00714	9,18	9,19	9,19	9,19	0,006
4	0,00950	9,19	9,16	9,17	9,17	0,015
5	0,01185	9,21	9,21	9,21	9,21	0,000
6	0,01418	9,19	9,19	9,19	9,19	0,000
7	0,01651	9,21	9,24	9,24	9,23	0,017
8	0,01882	9,24	9,22	9,25	9,24	0,015
9	0,02112	9,23	9,24	9,23	9,23	0,006
10	0,02341	9,22	9,25	9,22	9,23	0,017
11	0,02570	9,23	9,24	9,25	9,24	0,010
12	0,02797	9,25	9,23	9,25	9,24	0,012
13	0,02910	9,25	9,26	9,26	9,26	0,006

Tabla 4-8 Resultados de pH $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 35°C

Temperatura	35°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00239	9,11	9,10	9,11	9,11	0,006
2	0,00477	9,11	9,09	9,09	9,10	0,012
3	0,00714	9,08	9,08	9,07	9,08	0,006
4	0,00950	9,10	9,08	9,09	9,09	0,010
5	0,01185	9,08	9,08	9,08	9,08	0,000
6	0,01418	9,07	9,08	9,08	9,08	0,006
7	0,01651	9,08	9,08	9,08	9,08	0,000
8	0,01882	9,08	9,08	9,08	9,08	0,000
9	0,02112	9,10	9,09	9,08	9,09	0,010
10	0,02341	9,09	9,09	9,08	9,09	0,006
11	0,02570	9,09	9,08	9,08	9,08	0,006
12	0,02797	9,09	9,09	9,08	9,09	0,006
13	0,02910	9,10	9,08	9,08	9,09	0,012

Tabla 4-9 Resultados de pH $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 45°C

Temperatura	45°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00239	9,06	9,07	9,07	9,07	0,006
2	0,00477	9,07	9,07	9,06	9,07	0,006
3	0,00714	9,04	9,04	9,04	9,04	0,000
4	0,00950	9,05	9,05	9,04	9,05	0,006
5	0,01185	9,06	9,05	9,05	9,05	0,006
6	0,01418	9,05	9,04	9,05	9,05	0,006
7	0,01651	9,03	9,03	9,03	9,03	0,000
8	0,01882	9,03	9,03	9,03	9,03	0,000
9	0,02112	9,04	9,04	9,03	9,04	0,006
10	0,02341	9,04	9,03	9,03	9,03	0,006
11	0,02570	9,03	9,02	9,02	9,02	0,006
12	0,02797	9,03	9,02	9,02	9,02	0,006
13	0,02910	9,03	9,02	9,02	9,02	0,006

4.1.4 Medición de actividad del agua

Debido a problemas del equipo con el control de temperatura, se decidió realizar solo las mediciones a 25°C como muestra la Tabla 4-10.

Tabla 4-10 Resultados de actividad de agua de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C

Temperatura	25					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,2392%	0,9989	0,9988	0,9996	0,9991	0,0004
2	0,4772%	0,9983	0,9984	0,9978	0,9982	0,0003
3	0,7141%	0,9978	0,9987	0,9963	0,9976	0,0012
4	0,9499%	0,9974	0,9962	0,9969	0,9968	0,0006
5	1,1846%	0,9953	0,9969	0,9964	0,9962	0,0008
6	1,4182%	0,9951	0,9961	0,9949	0,9954	0,0006
7	1,6506%	0,9965	0,9945	0,9950	0,9953	0,0010
8	1,8820%	0,9923	0,9947	0,9954	0,9941	0,0016
9	2,1123%	0,9945	0,9934	0,9946	0,9942	0,0007
10	2,3415%	0,9933	0,9926	0,9945	0,9935	0,0010
11	2,5696%	0,9926	0,9922	0,9936	0,9928	0,0007
12	2,7967%	0,9912	0,9930	0,9909	0,9917	0,0011
13	2,9098%	0,9919	0,9909	0,9913	0,9914	0,0005

4.2 Metaborato de Litio

4.2.1 Medición de densidad

Se presentan las mediciones de densidad de las 13 muestras a 25°C (Tabla 4-11), 35°C (Tabla 4-12) y a 45°C (Tabla 4-13), con su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 4-11 Resultados de densidad de LiBO_2 a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [g/cm³]	Medición 2 [g/cm³]	Medición 3 [g/cm³]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00205	0,99941	0,99945	0,99944	0,99943	2,082,E-05
2	0,00410	1,00172	1,00172	1,00167	1,00170	2,887,E-05
3	0,00613	1,00382	1,00394	1,00394	1,00390	6,928,E-05
4	0,00816	1,00595	1,00608	1,00614	1,00606	9,713,E-05
5	0,01018	1,00842	1,00838	1,00840	1,00840	2,000,E-05
6	0,01219	1,01065	1,01061	1,01067	1,01064	3,055,E-05
7	0,01419	1,01290	1,01286	1,01286	1,01287	2,309,E-05
8	0,01618	1,01503	1,01503	1,01504	1,01503	5,774,E-06
9	0,01817	1,01716	1,01724	1,01725	1,01722	4,933,E-05
10	0,02015	1,01950	1,01945	1,01944	1,01946	3,215,E-05
11	0,02212	1,02148	1,02161	1,02152	1,02154	6,658,E-05
12	0,02408	1,02357	1,02368	1,02363	1,02363	5,508,E-05
13	0,02506	1,02466	1,02468	1,02467	1,02467	1,000,E-05

Tabla 4-12 Resultados de densidad de LiBO_2 a 35°C

Temperatura	35°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [g/cm³]	Medición 2 [g/cm³]	Medición 3 [g/cm³]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00205	0,99651	0,99646	0,99648	0,99648	2,517,E-05
2	0,00410	0,99869	0,99869	0,99871	0,99870	1,155,E-05
3	0,00613	1,00092	1,00096	1,00092	1,00093	2,309,E-05
4	0,00816	1,00316	1,00323	1,00318	1,00319	3,606,E-05
5	0,01018	1,00540	1,00542	1,00544	1,00542	2,000,E-05
6	0,01219	1,00754	1,00763	1,00758	1,00758	4,509,E-05
7	0,01419	1,00972	1,00975	1,00973	1,00973	1,528,E-05
8	0,01618	1,01191	1,01196	1,01191	1,01193	2,887,E-05
9	0,01817	1,01403	1,01414	1,01415	1,01411	6,658,E-05
10	0,02015	1,01635	1,01638	1,01637	1,01637	1,528,E-05
11	0,02212	1,01854	1,01859	1,01860	1,01858	3,215,E-05
12	0,02408	1,02064	1,02066	1,02069	1,02066	2,517,E-05
13	0,02506	1,02177	1,02185	1,02184	1,02182	4,359,E-05

Tabla 4-13 Resultados de densidad de LiBO_2 a 45°C

Temperatura	45°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [g/cm³]	Medición 2 [g/cm³]	Medición 3 [g/cm³]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00205	0,99255	0,99251	0,99256	0,99254	2,646,E-05
2	0,00410	0,99471	0,99476	0,99472	0,99473	2,646,E-05
3	0,00613	0,99703	0,99677	0,99705	0,99695	1,562,E-04
4	0,00816	0,99930	0,99934	0,99933	0,99932	2,082,E-05
5	0,01018	1,00142	1,00135	1,00150	1,00142	7,506,E-05
6	0,01219	1,00356	1,00364	1,00367	1,00362	5,686,E-05
7	0,01419	1,00577	1,00580	1,00580	1,00579	1,732,E-05
8	0,01618	1,00789	1,00782	1,00794	1,00788	6,028,E-05
9	0,01817	1,01019	1,01013	1,01022	1,01018	4,583,E-05
10	0,02015	1,01216	1,01233	1,01237	1,01229	1,115,E-04
11	0,02212	1,01452	1,01458	1,01448	1,01453	5,033,E-05
12	0,02408	1,01657	1,01661	1,01651	1,01656	5,033,E-05
13	0,02506	1,01751	1,01750	1,01749	1,01750	1,000,E-05

4.2.2 Medición de conductividad

Se presentan las mediciones de conductividad de las 13 muestras a 25°C (Tabla 4-14), 35°C (Tabla 4-15) y a 45°C (Tabla 4-16), con su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 4-14 Resultados de conductividad de LiBO_2 a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [mS/cm]	Medición 2 [mS/cm]	Medición 3 [mS/cm]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00205	2,041	2,037	2,040	2,039	0,002
2	0,00410	3,885	3,872	3,856	3,871	0,015
3	0,00613	5,489	5,485	5,455	5,476	0,019
4	0,00816	6,930	6,940	7,038	6,969	0,060
5	0,01018	8,459	8,479	8,470	8,469	0,010
6	0,01219	9,867	9,901	9,872	9,880	0,018
7	0,01419	11,210	11,150	11,280	11,213	0,065
8	0,01618	12,460	12,390	12,500	12,450	0,056
9	0,01817	13,710	13,710	13,700	13,707	0,006
10	0,02015	14,790	14,720	14,710	14,740	0,044
11	0,02212	15,520	15,400	15,630	15,517	0,115
12	0,02408	16,360	16,480	16,420	16,420	0,060
13	0,02506	16,680	16,820	16,800	16,767	0,076

Tabla 4-15 Resultados de conductividad de LiBO_2 a 35°C

Temperatura	35°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [mS/cm]	Medición 2 [mS/cm]	Medición 3 [mS/cm]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00205	2,351	2,326	2,349	2,342	0,014
2	0,00410	4,369	4,373	4,265	4,336	0,061
3	0,00613	6,078	6,120	6,151	6,116	0,037
4	0,00816	7,743	7,716	7,762	7,740	0,023
5	0,01018	9,140	9,117	9,159	9,139	0,021
6	0,01219	10,610	10,630	10,540	10,593	0,047
7	0,01419	11,910	11,960	11,990	11,953	0,040
8	0,01618	12,990	12,900	13,050	12,980	0,075
9	0,01817	14,160	14,170	14,200	14,177	0,021
10	0,02015	15,170	15,370	15,410	15,317	0,129
11	0,02212	16,500	16,270	16,520	16,430	0,139
12	0,02408	17,450	17,240	17,210	17,300	0,131
13	0,02506	17,520	17,680	17,690	17,630	0,095

Tabla 4-16 Resultados de conductividad de LiBO_2 a 45°C

Temperatura	45°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [mS/cm]	Medición 2 [mS/cm]	Medición 3 [mS/cm]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00205	2,508	2,533	2,523	2,521	0,013
2	0,00410	4,550	4,581	4,570	4,567	0,016
3	0,00613	6,384	6,405	6,382	6,390	0,013
4	0,00816	8,107	8,232	8,185	8,175	0,063
5	0,01018	9,823	9,756	9,800	9,793	0,034
6	0,01219	11,250	11,190	11,180	11,207	0,038
7	0,01419	12,510	12,550	12,560	12,540	0,026
8	0,01618	13,640	13,590	13,510	13,580	0,066
9	0,01817	14,730	14,580	14,840	14,717	0,131
10	0,02015	16,090	16,120	16,080	16,097	0,021
11	0,02212	17,000	16,920	17,130	17,017	0,106
12	0,02408	18,140	18,030	18,050	18,073	0,059
13	0,02506	18,690	18,320	18,390	18,467	0,197

4.2.3 Medición de pH

Se presentan las mediciones de pH de las 13 muestras a 25°C (Tabla 4-17), 35°C (Tabla 4-18) y a 45°C (Tabla 4-19), con su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 4-17 Resultados de pH de LiBO_2 a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00205	10,13	10,10	10,13	10,12	0,015
2	0,00410	10,15	10,15	10,15	10,15	0,002
3	0,00613	10,20	10,19	10,17	10,19	0,011
4	0,00816	10,18	10,19	10,22	10,20	0,019
5	0,01018	10,21	10,23	10,20	10,21	0,014
6	0,01219	10,19	10,20	10,21	10,20	0,007
7	0,01419	10,25	10,22	10,21	10,23	0,020
8	0,01618	10,28	10,26	10,29	10,28	0,013
9	0,01817	10,28	10,27	10,29	10,28	0,010
10	0,02015	10,28	10,30	10,28	10,29	0,014
11	0,02212	10,32	10,29	10,30	10,30	0,014
12	0,02408	10,30	10,31	10,32	10,31	0,009
13	0,02506	10,31	10,34	10,34	10,33	0,015

Tabla 4-18 Resultados de pH de LiBO_2 a 35°C

Temperatura	35°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00205	9,97	9,95	9,98	9,96	0,015
2	0,00410	10,02	10,02	10,02	10,02	0,002
3	0,00613	10,03	10,03	10,02	10,02	0,002
4	0,00816	10,02	10,02	10,02	10,02	0,002
5	0,01018	10,06	10,06	10,05	10,05	0,006
6	0,01219	10,07	10,06	10,06	10,06	0,008
7	0,01419	10,05	10,06	10,05	10,05	0,004
8	0,01618	10,10	10,09	10,10	10,09	0,007
9	0,01817	10,08	10,08	10,09	10,08	0,001
10	0,02015	10,09	10,14	10,12	10,12	0,025
11	0,02212	10,13	10,13	10,15	10,14	0,010
12	0,02408	10,17	10,15	10,14	10,15	0,014
13	0,02506	10,19	10,18	10,17	10,18	0,006

Tabla 4-19 Resultados de pH de LiBO_2 a 45°C

Temperatura	45°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00205	9,88	9,87	9,86	9,87	0,008
2	0,00410	9,89	9,89	9,89	9,89	0,003
3	0,00613	9,92	9,94	9,91	9,92	0,013
4	0,00816	9,91	9,90	9,88	9,90	0,012
5	0,01018	9,94	9,93	9,92	9,93	0,011
6	0,01219	9,95	9,94	9,95	9,95	0,005
7	0,01419	9,95	9,95	9,94	9,95	0,008
8	0,01618	10,00	9,99	9,99	9,99	0,007
9	0,01817	9,99	9,98	9,97	9,98	0,009
10	0,02015	10,02	10,01	10,01	10,01	0,006
11	0,02212	10,03	10,02	10,02	10,02	0,008
12	0,02408	10,05	10,03	10,02	10,03	0,015
13	0,02506	10,09	10,05	10,06	10,06	0,018

4.2.4 Medición de actividad del agua

Se presenta la Tabla 4-20 con las mediciones de actividad del agua, mediante el proceso descrito previamente a 25°C.

Tabla 4-20 Resultados de actividad del agua de LiBO_2 a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00205	0,997	1,000	0,999	0,999	0,002
2	0,00410	0,998	0,998	0,996	0,997	0,001
3	0,00613	0,998	0,997	0,996	0,997	0,001
4	0,00816	0,996	0,996	0,996	0,996	0,000
5	0,01018	0,997	0,994	0,994	0,995	0,001
6	0,01219	0,993	0,995	0,993	0,994	0,001
7	0,01419	0,995	0,994	0,989	0,993	0,003
8	0,01618	0,992	0,992	0,991	0,992	0,000
9	0,01817	0,993	0,993	0,989	0,992	0,002
10	0,02015	0,988	0,993	0,987	0,989	0,003
11	0,02212	0,988	0,990	0,987	0,988	0,001
12	0,02408	0,988	0,987	0,986	0,987	0,001
13	0,02506	0,988	0,987	0,983	0,986	0,003

4.3 Tetraborato de Sodio

4.3.1 Medición de densidad

Se presentan las mediciones de densidad de las 13 muestras a 25°C (Tabla 4-21 Tabla 4-1), 35°C (Tabla 4-22) y a 45°C (Tabla 4-23), con su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 4-21 Resultados de densidad de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [g/cm³]	Medición 2 [g/cm³]	Medición 3 [g/cm³]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00253	0,99949	0,99949	0,99958	0,99952	5,196,E-05
2	0,00505	1,00193	1,00190	1,00190	1,00191	1,732,E-05
3	0,00755	1,00427	1,00432	1,00431	1,00430	2,646,E-05
4	0,01004	1,00662	1,00670	1,00669	1,00667	4,359,E-05
5	0,01252	1,00892	1,00897	1,00896	1,00895	2,646,E-05
6	0,01499	1,01116	1,01124	1,01123	1,01121	4,359,E-05
7	0,01744	1,01341	1,01340	1,01347	1,01343	3,786,E-05
8	0,01988	1,01568	1,01567	1,01565	1,01567	1,528,E-05
9	0,02231	1,01809	1,01808	1,01806	1,01808	1,528,E-05
10	0,02473	1,02016	1,02018	1,02025	1,02020	4,726,E-05
11	0,02714	1,02234	1,02236	1,02241	1,02237	3,606,E-05
12	0,02953	1,02457	1,02456	1,02455	1,02456	1,000,E-05
13	0,03073	1,02547	1,02561	1,02561	1,02556	8,083,E-05

Tabla 4-22 Resultados de densidad de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 35°C

Temperatura	35°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [g/cm³]	Medición 2 [g/cm³]	Medición 3 [g/cm³]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00253	0,99684	0,99647	0,99657	0,99663	1,914,E-04
2	0,00505	0,99880	0,99873	0,99871	0,99875	4,726,E-05
3	0,00755	1,00109	1,00114	1,00108	1,00110	3,215,E-05
4	0,01004	1,00346	1,00347	1,00340	1,00344	3,786,E-05
5	0,01252	1,00577	1,00570	1,00569	1,00572	4,359,E-05
6	0,01499	1,00792	1,00795	1,00793	1,00793	1,528,E-05
7	0,01744	1,01015	1,01018	1,01014	1,01016	2,082,E-05
8	0,01988	1,01229	1,01233	1,01239	1,01234	5,033,E-05
9	0,02231	1,01475	1,01479	1,01491	1,01482	8,327,E-05
10	0,02473	1,01675	1,01677	1,01679	1,01677	2,000,E-05
11	0,02714	1,01894	1,01896	1,01892	1,01894	2,000,E-05
12	0,02953	1,02106	1,02107	1,02109	1,02107	1,528,E-05
13	0,03073	1,02208	1,02209	1,02210	1,02209	1,000,E-05

Tabla 4-23 Resultados de densidad de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 45°C

Temperatura	45°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [g/cm³]	Medición 2 [g/cm³]	Medición 3 [g/cm³]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00253	0,99269	0,99242	0,99264	0,99258	1,436,E-04
2	0,00505	0,99487	0,99490	0,99490	0,99489	1,732,E-05
3	0,00755	0,99709	0,99707	0,99716	0,99711	4,726,E-05
4	0,01004	0,99966	0,99977	0,99974	0,99972	5,686,E-05
5	0,01252	1,00180	1,00186	1,00186	1,00184	3,464,E-05
6	0,01499	1,00395	1,00404	1,00406	1,00402	5,859,E-05
7	0,01744	1,00621	1,00623	1,00621	1,00622	1,155,E-05
8	0,01988	1,00822	1,00832	1,00830	1,00828	5,292,E-05
9	0,02231	1,01071	1,01072	1,01082	1,01075	6,083,E-05
10	0,02473	1,01270	1,01272	1,01275	1,01272	2,517,E-05
11	0,02714	1,01483	1,01484	1,01477	1,01481	3,786,E-05
12	0,02953	1,01692	1,01698	1,01702	1,01697	5,033,E-05
13	0,03073	1,01783	1,01803	1,01797	1,01794	1,026,E-04

4.3.2 Medición de conductividad

Se presentan las mediciones de conductividad de las 13 muestras a 25°C (Tabla 4-24), 35°C (Tabla 4-25) y a 45°C (Tabla 4-26), con su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 4-24 Resultados de conductividad de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [mS/cm]	Medición 2 [mS/cm]	Medición 3 [mS/cm]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00253	1,669	1,677	1,668	1,671	0,005
2	0,00505	3,139	3,143	3,156	3,146	0,009
3	0,00755	4,448	4,456	4,440	4,448	0,008
4	0,01004	5,918	5,939	5,939	5,932	0,012
5	0,01252	7,300	7,296	7,288	7,295	0,006
6	0,01499	8,500	8,556	8,595	8,550	0,048
7	0,01744	9,855	9,830	9,823	9,836	0,017
8	0,01988	11,080	11,120	11,040	11,080	0,040
9	0,02231	12,530	12,660	12,590	12,593	0,065
10	0,02473	13,430	13,340	13,470	13,413	0,067
11	0,02714	14,330	14,420	14,410	14,387	0,049
12	0,02953	15,290	15,330	15,330	15,317	0,023
13	0,03073	15,830	15,770	15,850	15,817	0,042

Tabla 4-25 Resultados de conductividad de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 35°C

Temperatura	35°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [mS/cm]	Medición 2 [mS/cm]	Medición 3 [mS/cm]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00253	1,702	1,714	1,713	1,710	0,007
2	0,00505	3,131	3,162	3,156	3,150	0,016
3	0,00755	4,710	4,693	4,698	4,700	0,009
4	0,01004	6,280	6,257	6,260	6,266	0,013
5	0,01252	7,704	7,664	7,648	7,672	0,029
6	0,01499	9,070	9,075	9,037	9,061	0,021
7	0,01744	10,450	10,420	10,450	10,440	0,017
8	0,01988	11,550	11,530	11,590	11,557	0,031
9	0,02231	13,020	13,030	13,080	13,043	0,032
10	0,02473	13,820	13,920	13,970	13,903	0,076
11	0,02714	14,720	14,880	14,830	14,810	0,082
12	0,02953	15,830	15,900	15,830	15,853	0,040
13	0,03073	16,290	16,150	16,170	16,203	0,076

Tabla 4-26 Resultados de conductividad de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 45°C

Temperatura	45°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1 [mS/cm]	Medición 2 [mS/cm]	Medición 3 [mS/cm]	Promedio	Desviación estándar
1	0,00253	1,841	1,834	1,839	1,838	0,004
2	0,00505	3,485	3,471	3,471	3,476	0,008
3	0,00755	5,115	5,138	5,142	5,132	0,015
4	0,01004	6,935	6,918	6,958	6,937	0,020
5	0,01252	8,517	8,530	8,550	8,532	0,017
6	0,01499	9,732	9,697	9,780	9,736	0,042
7	0,01744	11,240	11,280	11,270	11,263	0,021
8	0,01988	12,400	12,550	12,600	12,517	0,104
9	0,02231	13,810	13,850	13,820	13,827	0,021
10	0,02473	14,590	14,570	14,610	14,590	0,020
11	0,02714	15,420	15,470	15,610	15,500	0,098
12	0,02953	16,670	16,590	16,760	16,673	0,085
13	0,03073	17,040	16,960	16,940	16,980	0,053

4.3.3 Medición de pH

Se presentan las mediciones de pH de las 13 muestras a 25°C (Tabla 4-27), 35°C (Tabla 4-28) y a 45°C (Tabla 4-29), con su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 4-27 Resultados de pH de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00253	9,23	9,29	9,29	9,27	0,037
2	0,00505	9,27	9,27	9,27	9,27	0,002
3	0,00755	9,28	9,31	9,24	9,27	0,031
4	0,01004	9,17	9,19	9,20	9,19	0,013
5	0,01252	9,25	9,26	9,31	9,27	0,029
6	0,01499	9,35	9,31	9,44	9,36	0,067
7	0,01744	9,32	9,32	9,30	9,31	0,011
8	0,01988	9,37	9,31	9,36	9,34	0,032
9	0,02231	9,25	9,26	9,26	9,26	0,005
10	0,02473	9,31	9,30	9,30	9,30	0,008
11	0,02714	9,28	9,31	9,27	9,29	0,018
12	0,02953	9,32	9,35	9,37	9,35	0,023
13	0,03073	9,43	9,42	9,39	9,41	0,019

Tabla 4-28 Resultados de pH de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 35°C

Temperatura	35°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00253	9,17	9,20	9,19	9,19	0,011
2	0,00505	9,18	9,18	9,19	9,18	0,009
3	0,00755	9,21	9,21	9,19	9,20	0,011
4	0,01004	9,13	9,14	9,12	9,13	0,013
5	0,01252	9,15	9,16	9,15	9,15	0,007
6	0,01499	9,22	9,22	9,26	9,23	0,022
7	0,01744	9,24	9,24	9,22	9,23	0,014
8	0,01988	9,25	9,23	9,24	9,24	0,012
9	0,02231	9,17	9,17	9,18	9,17	0,006
10	0,02473	9,19	9,20	9,20	9,19	0,003
11	0,02714	9,21	9,26	9,23	9,23	0,025
12	0,02953	9,23	9,29	9,26	9,26	0,031
13	0,03073	9,27	9,31	9,27	9,28	0,022

Tabla 4-29 Resultados de pH de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 45°C

Temperatura	45°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00253	9,09	9,10	9,11	9,10	0,007
2	0,00505	9,12	9,11	9,12	9,12	0,002
3	0,00755	9,12	9,11	9,11	9,11	0,010
4	0,01004	9,04	9,03	9,05	9,04	0,011
5	0,01252	9,07	9,09	9,07	9,08	0,008
6	0,01499	9,14	9,14	9,15	9,14	0,004
7	0,01744	9,16	9,16	9,17	9,16	0,002
8	0,01988	9,21	9,18	9,20	9,19	0,011
9	0,02231	9,11	9,13	9,11	9,11	0,009
10	0,02473	9,16	9,16	9,16	9,16	0,002
11	0,02714	9,17	9,15	9,16	9,16	0,009
12	0,02953	9,18	9,18	9,18	9,18	0,002
13	0,03073	9,23	9,23	9,22	9,23	0,009

4.3.4 Medición de actividad del agua

Se presenta la Tabla 4-30 Tabla 4-20 con las mediciones de actividad del agua, mediante el proceso descrito previamente a 25°C.

Tabla 4-30 Resultados de actividad del de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C

Temperatura	25°C					
Muestra	Fracción másica	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio	Desviación estándar
1	0,00253	0,9991	0,9992	0,9986	0,9990	0,000
2	0,00505	0,9989	0,9995	0,9953	0,9979	0,002
3	0,00755	0,9977	0,9978	0,9969	0,9975	0,000
4	0,01004	0,9977	0,9948	0,9957	0,9961	0,001
5	0,01252	0,9957	0,9957	0,9938	0,9951	0,001
6	0,01499	0,9940	0,9959	0,9946	0,9948	0,001
7	0,01744	0,9951	0,9924	0,9922	0,9932	0,002
8	0,01988	0,9930	0,9949	0,9925	0,9935	0,001
9	0,02231	0,9917	0,9926	0,9918	0,9920	0,000
10	0,02473	0,9901	0,9907	0,9930	0,9913	0,002
11	0,02714	0,9899	0,9905	0,9912	0,9905	0,001
12	0,02953	0,9887	0,9895	0,9903	0,9895	0,001
13	0,03073	0,9892	0,9901	0,9875	0,9889	0,001

4.4 Pruebas de solubilidad

Se presentan las tablas de tiempo de equilibrio de densidad de soluciones saturadas (Tabla 4-31, Tabla 4-32 y Tabla 4-33) y sus gráficas (Figura 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3), con el posterior resultado de análisis por absorción atómica en la Tabla 4-34 para conocer el límite de saturación a 25°C.

Tabla 4-31 Resultados de densidad a 25°C en el tiempo de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

Tetraborato de Litio		Temperatura	25	°C	
Fecha	Densidad			Promedio	%dif
08-nov	1,01807	1,01804	1,01809	1,01807	NA
14-nov	1,01950	1,01937	1,01946	1,01944	0,1352
05-dic	1,01978	1,01974	1,01975	1,01976	0,0307
06-dic	1,02058	1,02057	1,02056	1,02057	0,0798
07-dic	1,02071	1,02068	1,02067	1,02069	0,0114
07-dic	1,02076	1,02072	1,02077	1,02075	0,0062
11-dic	1,02083	1,0209	1,02089	1,02087	0,0121
12-dic	1,02247	1,02242	1,02245	1,02245	0,1541
13-dic	1,02232	1,02239	1,02235	1,02235	-0,0091
14-dic	1,02256	1,02262	1,02265	1,02261	0,0251
15-dic	1,02261	1,02274	1,02278	1,02271	0,0098
18-dic	1,02287	1,02287	1,02279	1,02284	0,0130
20-dic	1,02304	1,02305	1,02303	1,02304	0,0192
21-dic	1,02297	1,02307	1,02307	1,02304	-0,0003

Tabla 4-32 Resultados de densidad a 25°C en el tiempo de LiBO_2 .

Metaborato de Litio		Temperatura	25	°C	
Fecha	Densidad			Promedio	%dif
14-nov	1,02524	1,02522	1,02514	1,02520	NA
05-dic	1,02933	1,02928	1,02938	1,02933	0,4028
06-dic	1,03562	1,03562	1,03561	1,03562	0,6108
07-dic	1,03585	1,03585	1,03596	1,03589	0,0261
07-dic	1,03617	1,03622	1,03625	1,03621	0,0315
11-dic	1,03640	1,03628	1,03632	1,03633	0,0116
12-dic	1,03681	1,03680	1,03676	1,03679	0,0441
13-dic	1,03657	1,03681	1,03674	1,03671	-0,0080
14-dic	1,03676	1,03680	1,03684	1,03680	0,0090
18-dic	1,03705	1,03709	1,03697	1,03704	0,0228
20-dic	1,03716	1,03710	1,03710	1,03712	0,0080
21-dic	1,03704	1,03713	1,03715	1,03711	-0,0013

Tabla 4-33 Resultados de densidad a 25°C en el tiempo de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

Tetraborato de Sodio		Temperatura	25		°C
Fecha	Densidad			Promedio	%dif
12-dic	1,02740	1,02746	1,02743	1,02743	NA
13-dic	1,02716	1,02718	1,02723	1,02719	-0,0234
14-dic	1,02820	1,02819	1,02827	1,02822	0,1003
15-dic	1,02720	1,02725	1,02723	1,02723	-0,0966
18-dic	1,02709	1,02700	1,02706	1,02705	-0,0172
20-dic	1,02700	1,02705	1,02707	1,02704	-0,0010
21-dic	1,02694	1,02709	1,02712	1,02705	0,0010

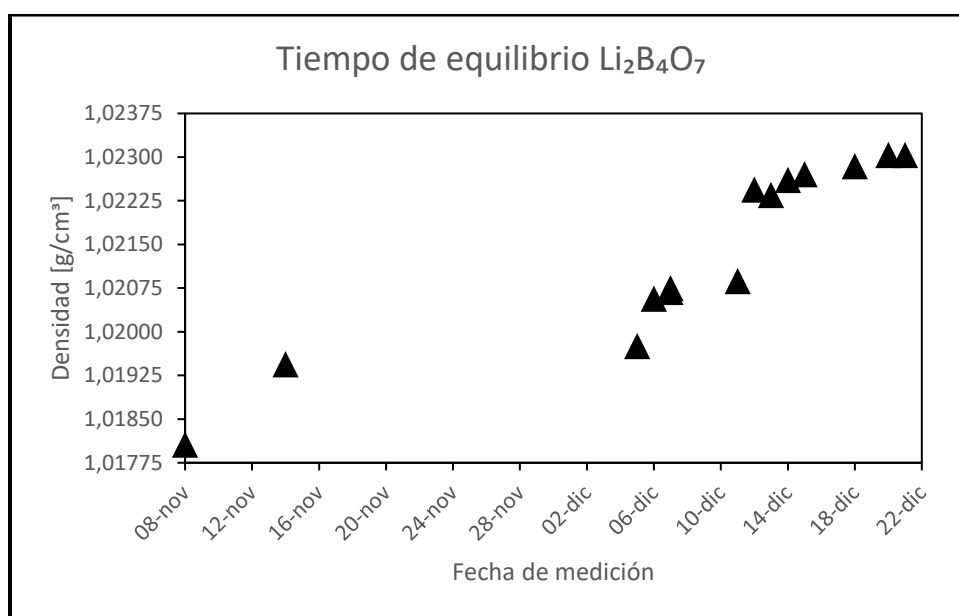


Figura 4-1 Tiempo de equilibrio de densidad de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

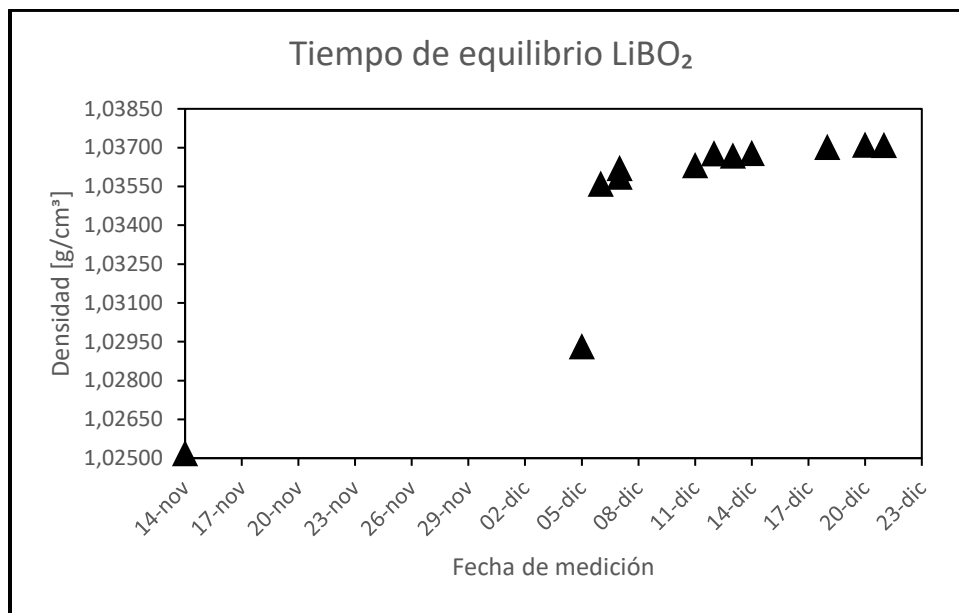


Figura 4-2 Tiempo de equilibrio de densidad de LiBO₂.

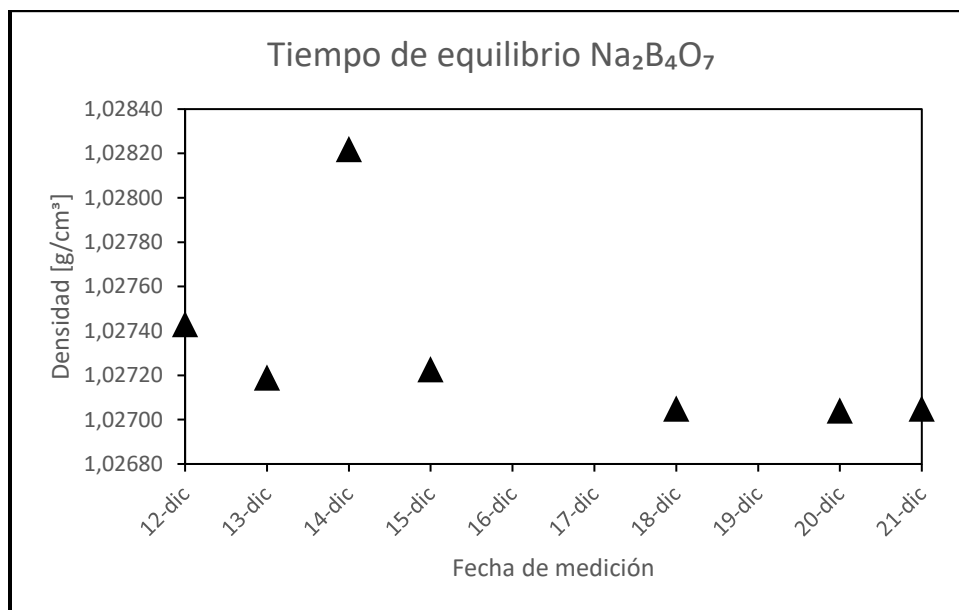


Figura 4-3 Tiempo de equilibrio de densidad de Na₂B₄O₇.

Una vez alcanzada la estabilidad de densidad medida, se obtuvo la concentración del catión en solución, desde la cual se obtiene la cantidad máxima soluble del electrolito correspondiente.

Tabla 4-34 Resultados de solubilidad experimentales y obtenidas desde literatura.

Solubilidad	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ [g/L]	LiBO_2 [g/L]	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ [g/L]
Literatura	29,97 [29]	25,7 [27]	31,7 [28]
Este trabajo	28,02	33,47	26,26

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE DATOS

5.1 Comparación y elección de modelos propuestos

Para la comparación entre modelos se analizan los errores para obtener la desviación media absoluta (AAD) entre los datos experimentales de cada caso y su cálculo con el respectivo modelo.

$$AAD = \frac{\sum_i^n \frac{|Exp_i - Calc_i|}{Calc_i}}{n} * 100 \quad (25)$$

Como se menciona en la sección 2.2, se comparan los modelos de Othmer y Guo, para la obtención de un modelo de densidad y el modelo de Othmer con los modelos propuestos por Claros para conductividad y pH. Para esto se observan los AAD en la Tabla 5-1. Una vez seleccionado el modelo más ideal, se continuarán los análisis con los resultados de cada propiedad en la sección 5.2 con el modelo escogido.

Tabla 5-1 Compilación de AAD (%) de modelos propuestos para cada propiedad.

Densidad	Li₂B₄O₇	LiBO₂	Na₂B₄O₇
Othmer	0,01524	0,01075	0,01781
Guo	0,01518	0,01050	0,01746
Conductividad	Li₂B₄O₇	LiBO₂	Na₂B₄O₇
Othmer	4,6015	728,0363	595,9837
Claros	2,6238	0,9901	1,4145
pH	Li₂B₄O₇	LiBO₂	Na₂B₄O₇
Othmer	11,4155	15,5927	11,6298
Claros	0,0791	0,1145	0,3404

Para la densidad tanto la regla de Othmer como el modelo de Guo se obtienen resultados satisfactorios con un bajo AAD, por lo que el ajuste representa de manera precisa la realidad de la solución generando una posibilidad de predicción sólo a partir de los parámetros de los modelos, sin embargo, a pesar de ser sólo un poco más preciso el modelo de Guo, la regla de Othmer está bien establecida como modelo de densidad, por su practicidad de utilizar los parámetros independientes de la temperatura, a diferencia del otro modelo, el que requiere un parámetro para cada temperatura, siendo menos versátil al momento de realizar predicciones de densidad a diferentes temperaturas de las obtenidas experimentalmente en este trabajo. Por esto, se decide continuar la totalidad de modelamiento con la Regla de Othmer para la densidad.

Por otro lado, como se observa en la Tabla 5-1, la Regla de Othmer no genera un modelamiento exitoso de las propiedades de conductividad y pH, que, por el contrario, los modelos propuestos por Claros, señalados por las ecuaciones (21) y

(22), si obtienen una precisión esperada, por lo que las predicciones con este modelo pueden ser confiables y certeras al momento de lo esperado experimentalmente. Por esto se decide continuar con los modelos de Claros para la modelación de conductividad y pH. Todos los parámetros escogidos son resumidos en la Tabla 5-1.

5.2 Análisis de datos

5.2.1 Análisis de densidad

Por medio de la minimización del error cuadrático promedio descrito por la ecuación (23), se obtuvieron los parámetros de Othmer para densidad para todas las sales, cuyo modelamiento refleja de manera bastante precisa el aumento de densidad a mayor concentración de las sales, tales como se muestra en la Figura 5-1, la Figura 5-3 y la Figura 5-5, siendo quien genera un mayor aumento el tetraborato de sodio, seguido por el metaborato de litio y finalmente, el tetraborato de litio, debido al aumento de concentración, con diferencias porcentuales mínimas de diferencia. Por otro lado, se observó que la dependencia de la densidad con respecto a la temperatura para todos es decreciente, siendo el tetraborato de sodio quién reduce más su densidad con la temperatura, luego el tetraborato de litio y finalmente el metaborato de litio, nuevamente por diferencias porcentuales mínimas, esto debido a que el aumento volumétrico es mayor en las moléculas más grandes, como es el caso del tetraborato de sodio y litio respectivamente.

Finalmente, como muestran la Figura 5-2, la Figura 5-4, y la Figura 5-6, los datos presentan una buena aleatoriedad por lo que se descarta un sesgo operacional o alguna tendencia posible que provoque errores o mal interpretación de los datos.

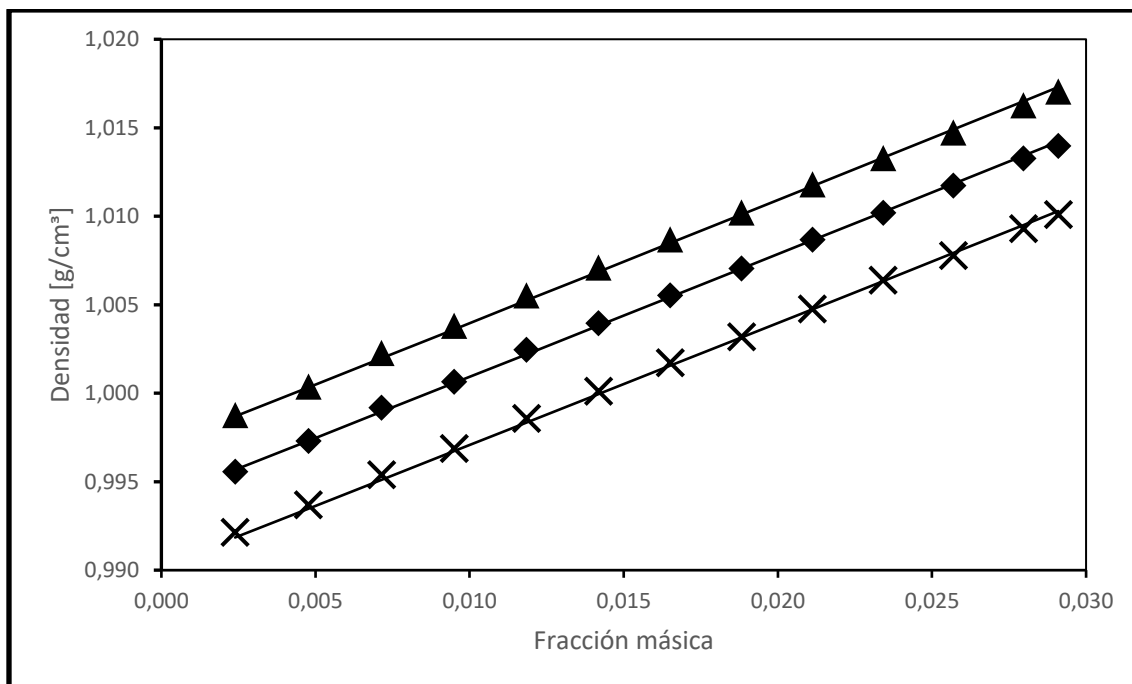


Figura 5-1 Densidad versus fracción másica de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ($\blacktriangle$: 25°C, $\blacklozenge$: 35°C, $\times$: 45°C, línea cont.: Modelo).

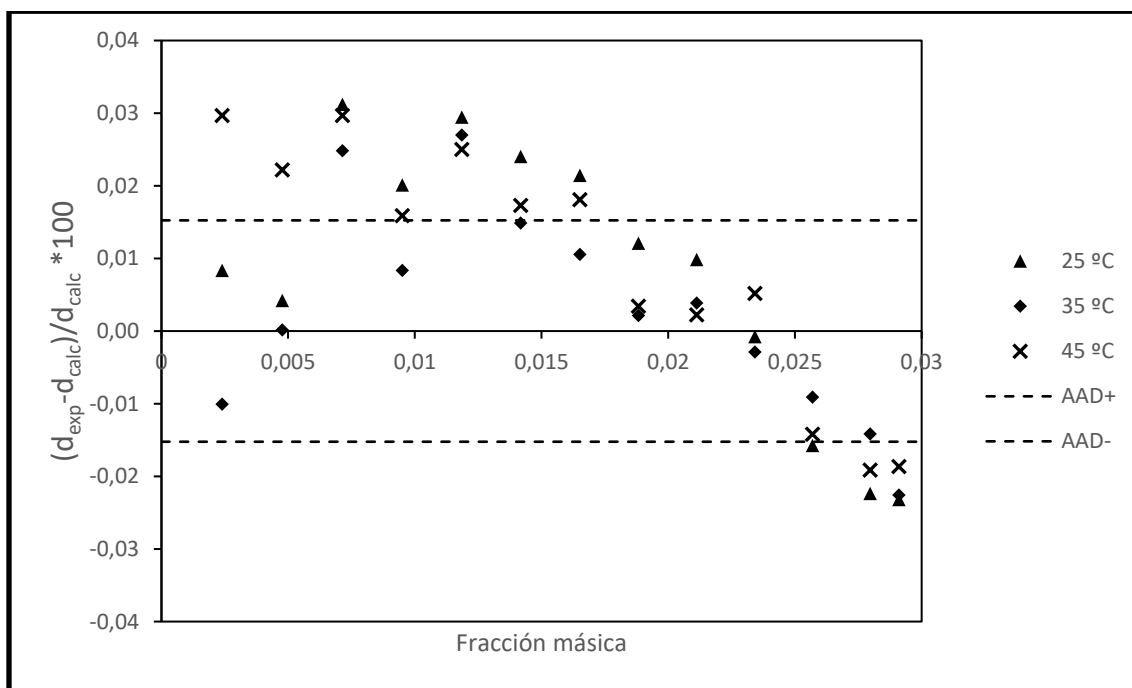


Figura 5-2 Dispersión de error de densidad de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

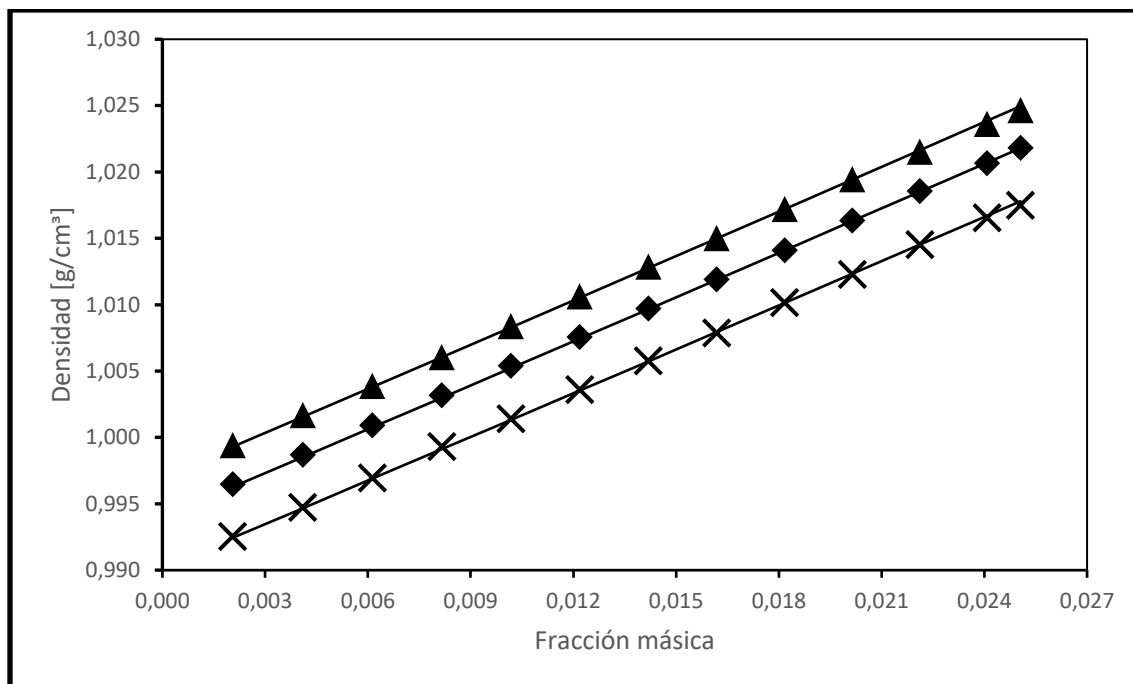


Figura 5-3 Densidad vs fracción másica de LiBO₂ (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, línea cont.: Modelo).

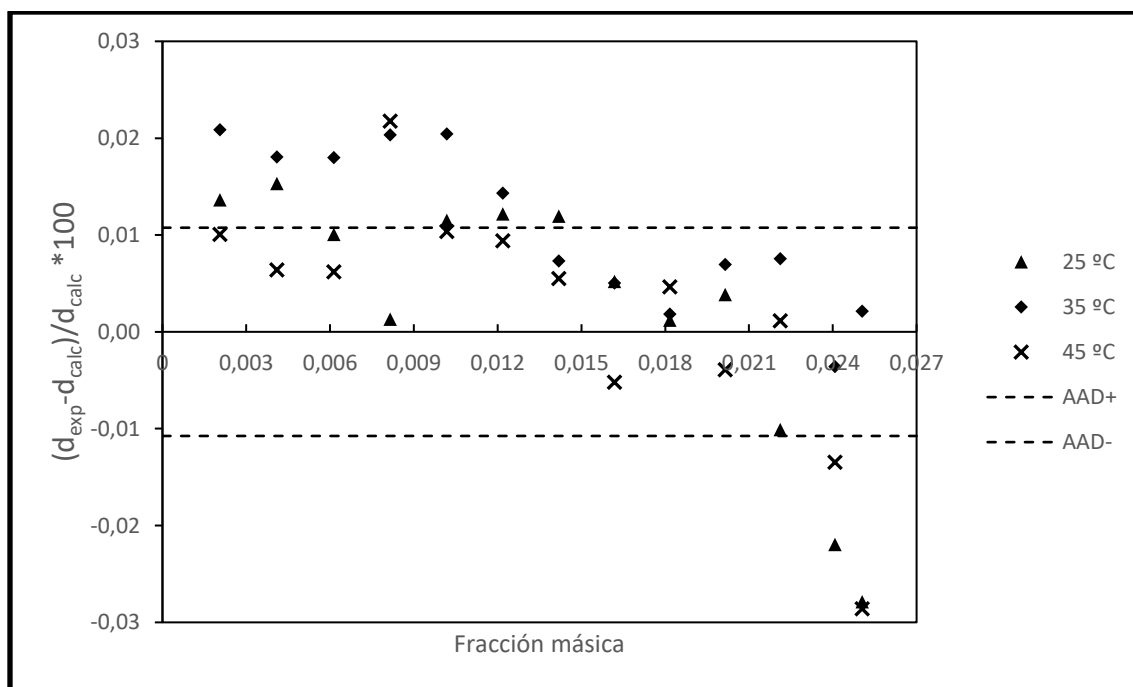


Figura 5-4 Dispersión de error de densidad de LiBO₂.

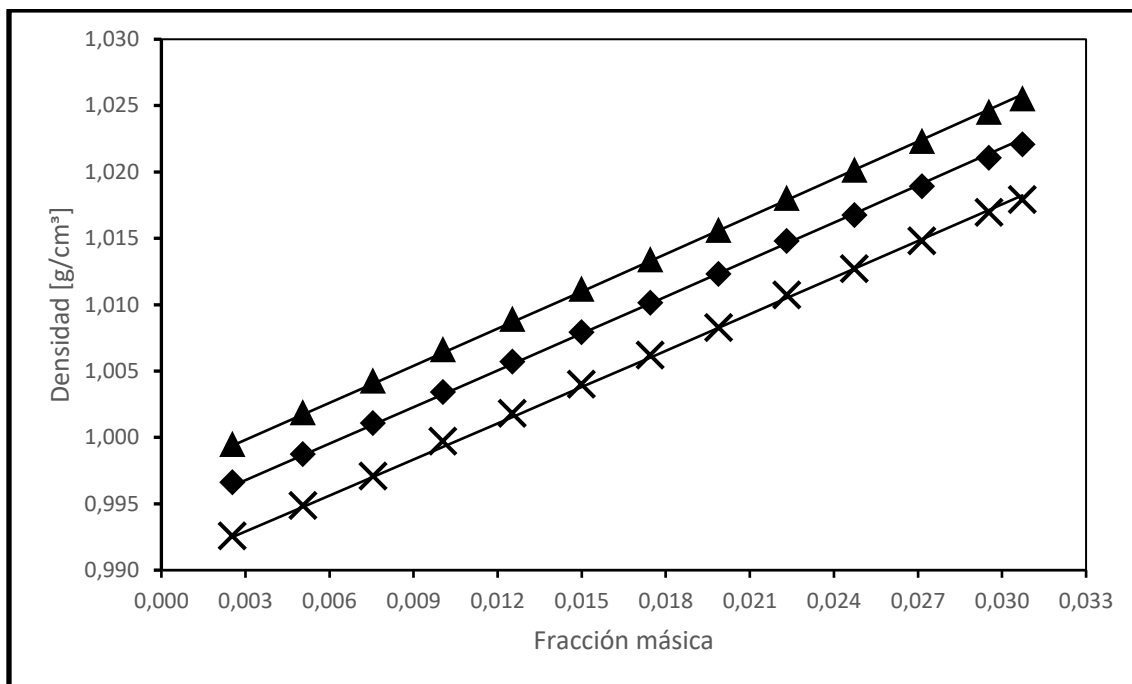


Figura 5-5 Densidad vs fracción másica de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ($\blacktriangle$: 25°C, $\blacklozenge$: 35°C, X: 45°C, línea cont.: Modelo).

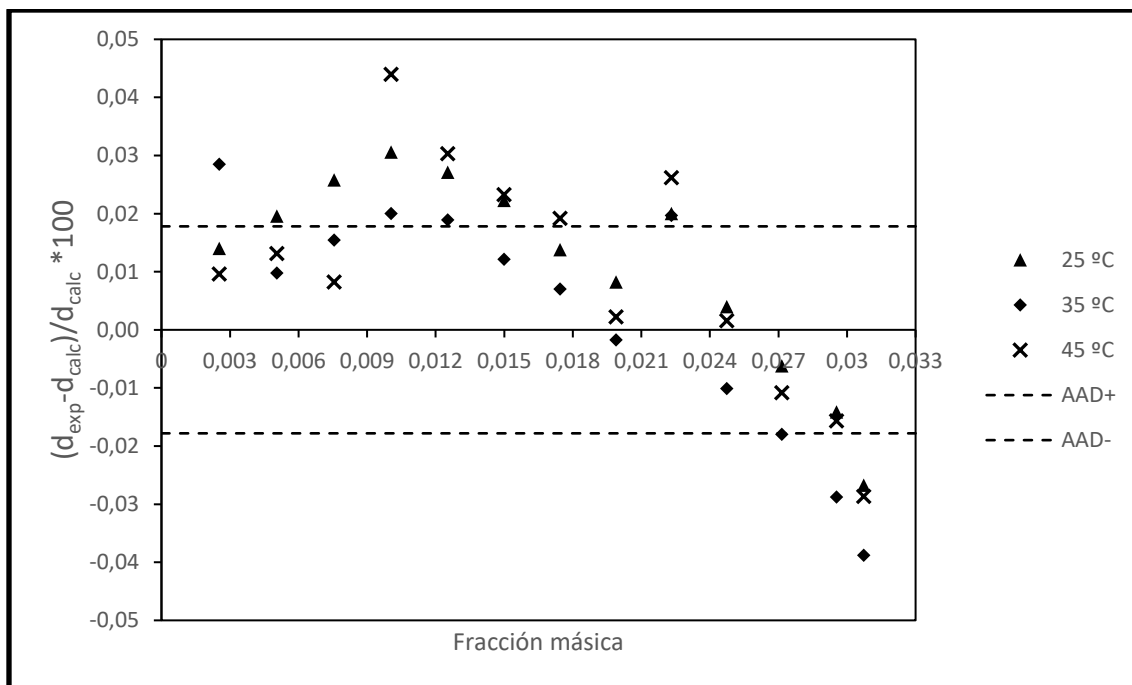


Figura 5-6 Dispersión de error de densidad de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

5.2.2 Análisis de Conductividad

De la misma manera que la densidad, utilizando la minimización de errores cuadráticos promedios, se obtuvieron los parámetros que satisfacen de mejor manera el modelamiento de conductividad mediante la ecuación propuesto por

Claros para conductividad, ecuación (21), como muestran la Figura 5-7, la Figura 5-9 y la Figura 5-11, donde es posible notar además, que el aumento de la concentración genera un aumento de la conductividad en los tres sistemas. La sal que genera un mayor aumento de conductividad en el sistema debido al aumento de concentración es el tetraborato de litio, seguido por el tetraborato de sodio y finalmente, el metaborato de litio. Por otro lado, se observó que la dependencia de la conductividad con respecto a la temperatura para todos es creciente, siendo el tetraborato de litio quién aumenta más su conductividad con la temperatura, luego el tetraborato de sodio y finalmente el metaborato de litio.

Finalmente, la Figura 5-8, la Figura 5-10 y la Figura 5-12, muestran una aleatoriedad de datos descartando errores o sesgos de medición.

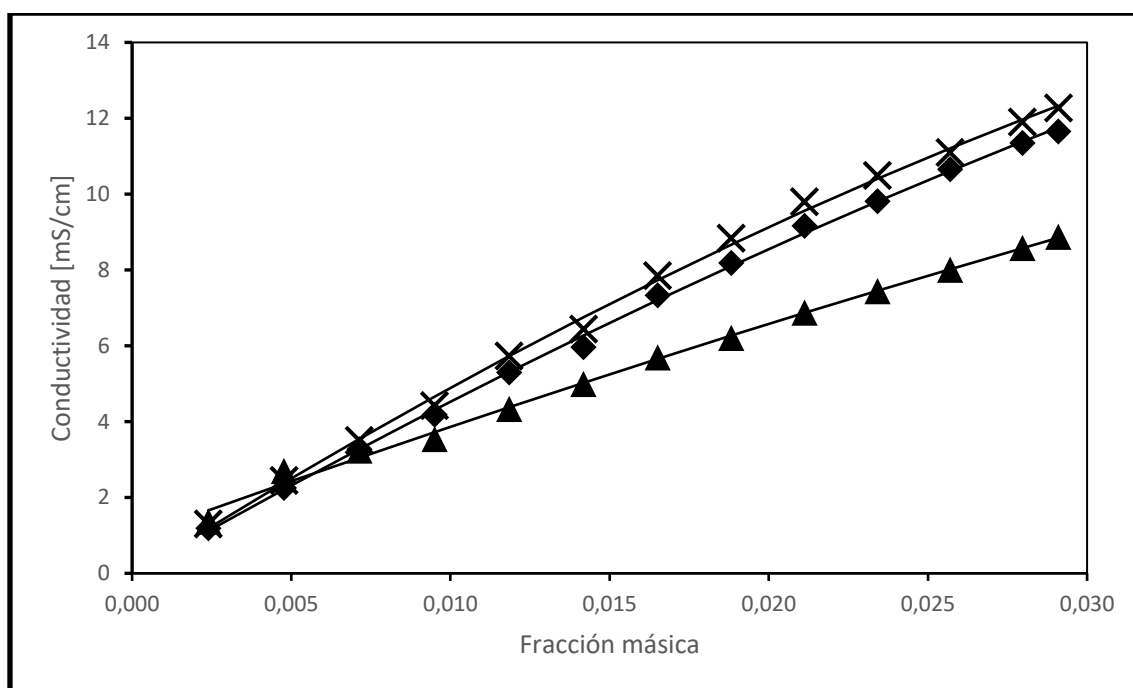


Figura 5-7 Conductividad vs fracción másica de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, línea cont.: Modelo).

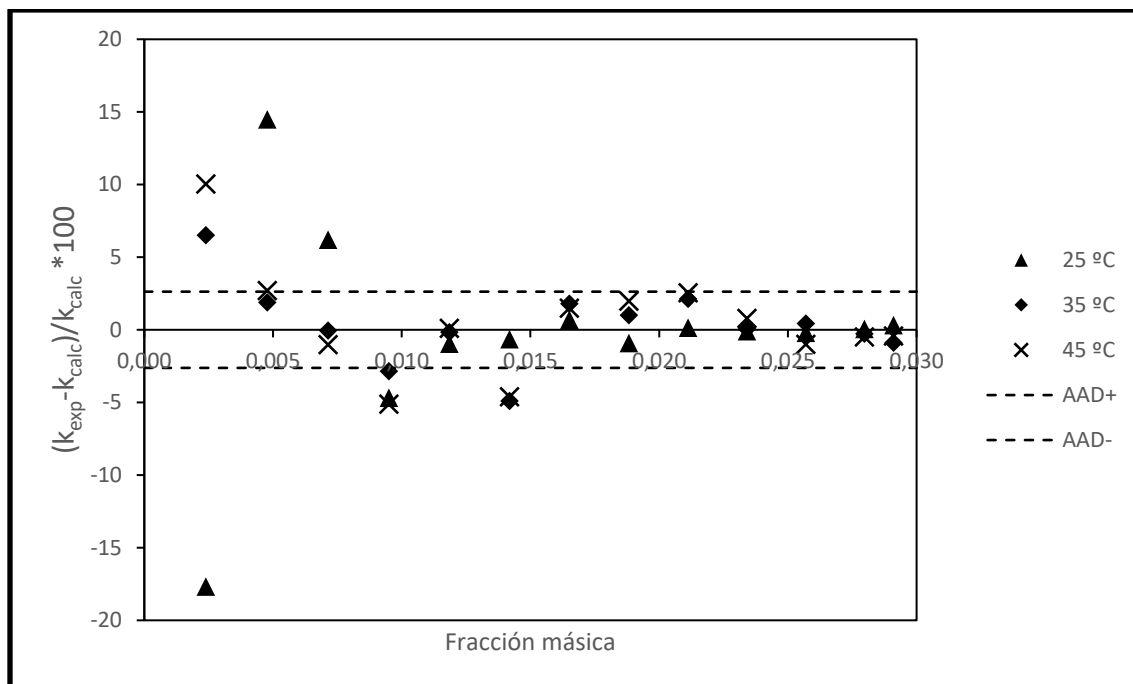


Figura 5-8 Dispersión de error de conductividad de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

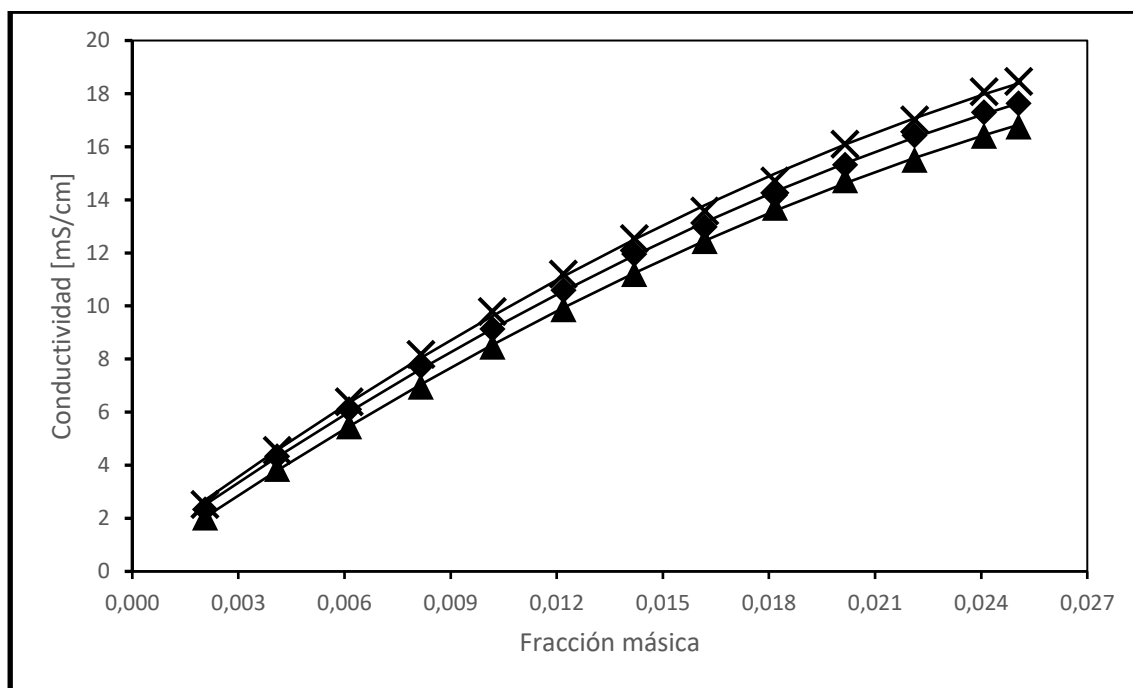


Figura 5-9 Conductividad vs fracción másica de LiBO_2 ($\blacktriangle$: 25°C, $\blacklozenge$: 35°C, X: 45°C, línea cont.: Modelo).

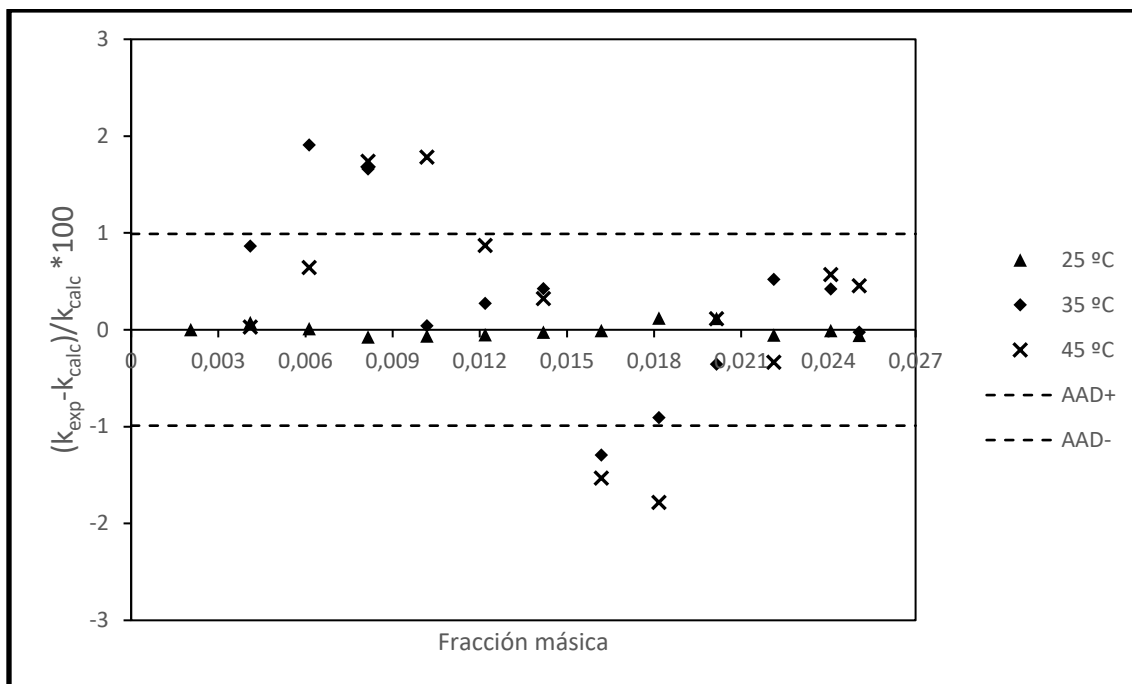


Figura 5-10 Dispersión de error de conductividad de LiBO_2 .

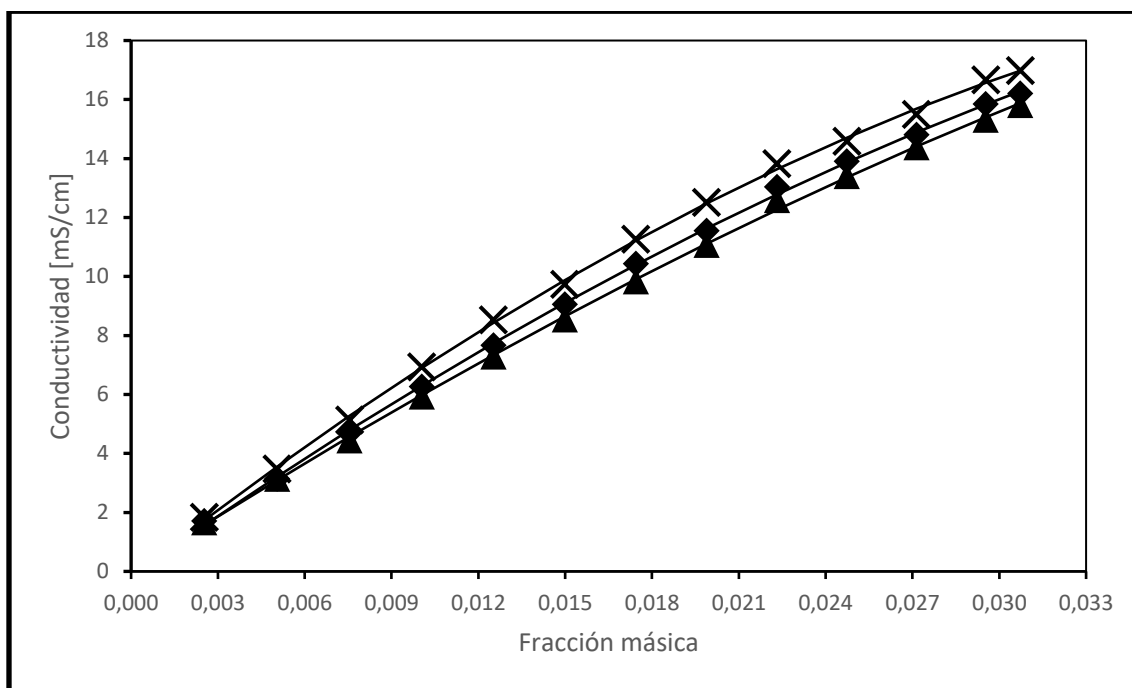


Figura 5-11 Conductividad vs fracción mísica de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ($\blacktriangle$: 25°C, $\blacklozenge$: 35°C, X: 45°C, línea cont.: Modelo).

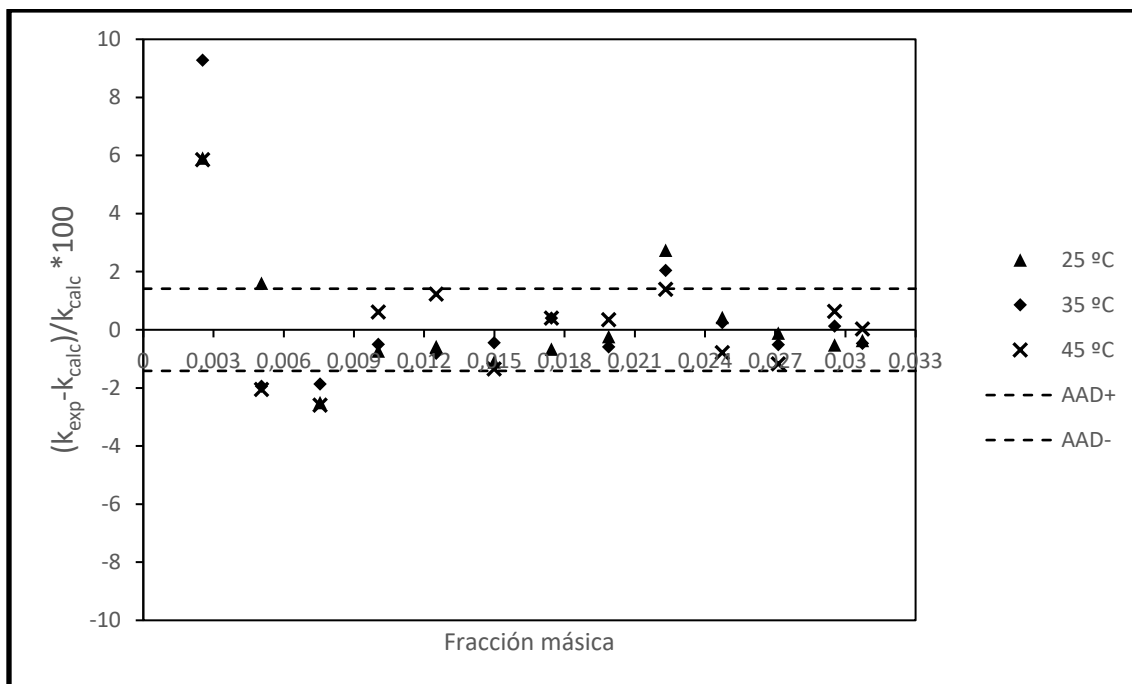


Figura 5-12 Dispersión de error de conductividad de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

5.2.3 Análisis de pH

Se realizaron los ajustes de parámetros que satisficieron de mejor manera la minimización de errores cuadráticos promedios, para el modelo de pH propuesto por Claros, la ecuación (22), obteniendo una modelación aceptable dentro del anómalo comportamiento. Esto debido a que la sensibilidad del medidor descrito en la sección 3.2.2 es sólo hasta el segundo decimal y las variaciones son muy pequeñas, por lo que cualquiera sólo un poco mayor, puede parecer un cambio drástico, aunque no lo sea realmente. La principal razón es debido a que la disociación de cada sal genera la liberación de aniones tetraborato, los cuales se disocian en iones boratos, lo que finalmente culmina en la posible formación de ácido bórico, dependiendo de la concentración de cada sal, por lo que es esperable que sea un sistema de poco equilibrio al respecto del pH.

Como se notó en la Figura 5-13, la Figura 5-15 y la Figura 5-17, la modelación sigue en gran medida la tendencia de cada sal, exceptuando el tetraborato de litio, que a 35°C y 45°C tiende a disminuir el pH, sin embargo, la variación máxima de cada sistema en términos de pH no supera los 0.2[-] puntos, por lo que es certero decir que la variación es mínima o en comparación a otras sales, casi nula. Además, como muestra la Figura 5-14, la Figura 5-16 y la Figura 5-18, no se encontró un patrón de error y la aleatoriedad de los datos da cuenta de una buena medición realizada.

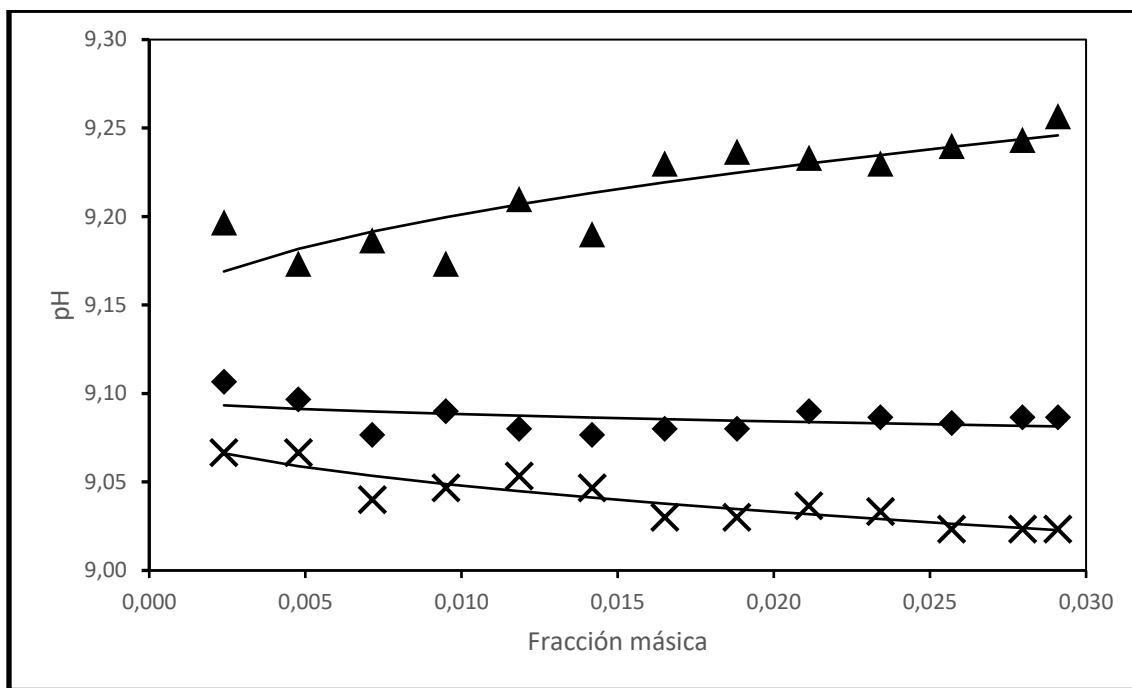


Figura 5-13 pH vs fracción másica de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (▲: 25°C, ◆: 35°C, X: 45°C, línea cont.: Modelo).

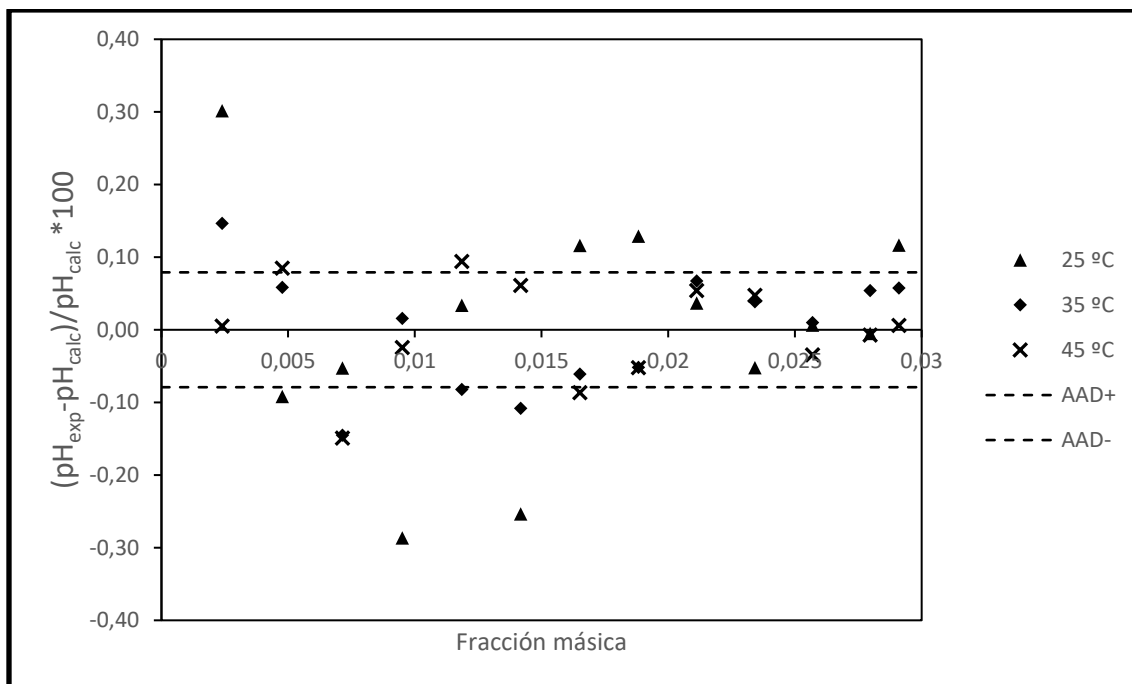


Figura 5-14 Dispersión de error de pH de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

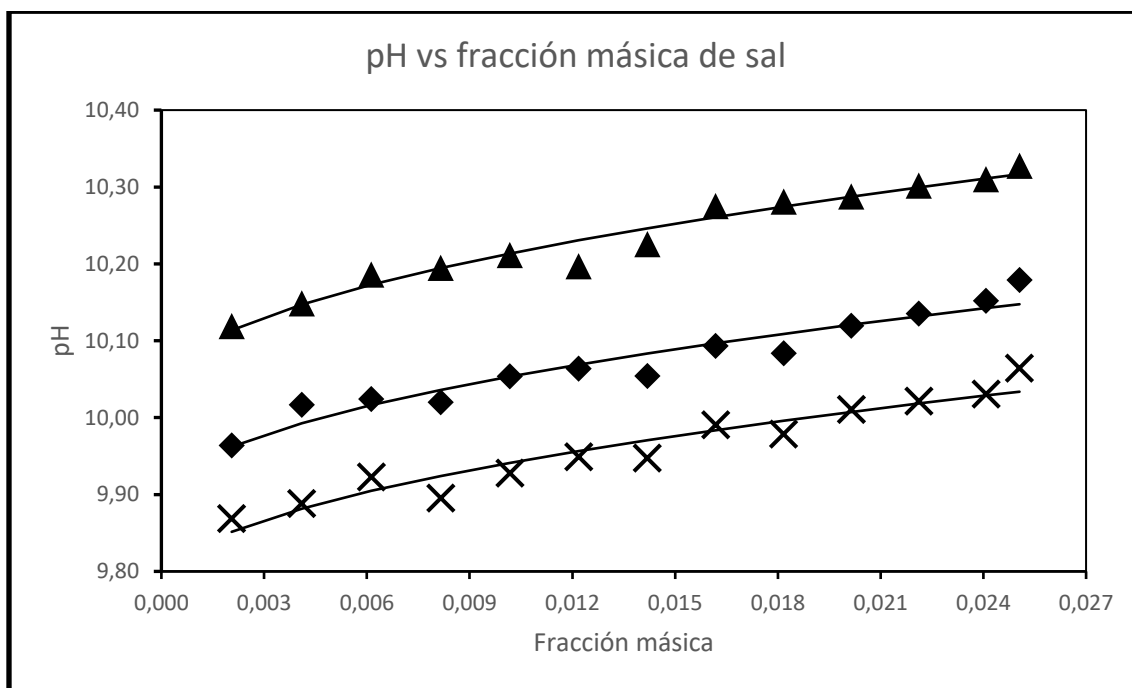


Figura 5-15 pH vs fracción mísica de LiBO_2 ($\blacktriangle$: 25°C, $\blacklozenge$: 35°C, X: 45°C, línea cont.: Modelo).

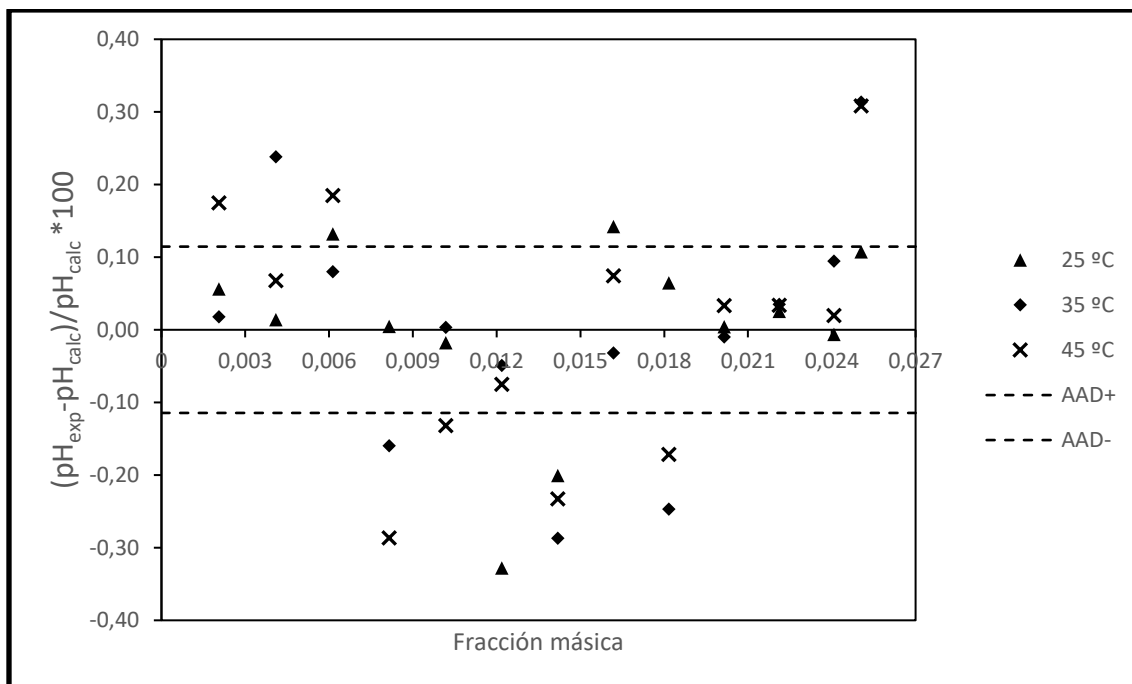


Figura 5-16 Dispersión de error de pH de LiBO_2 .

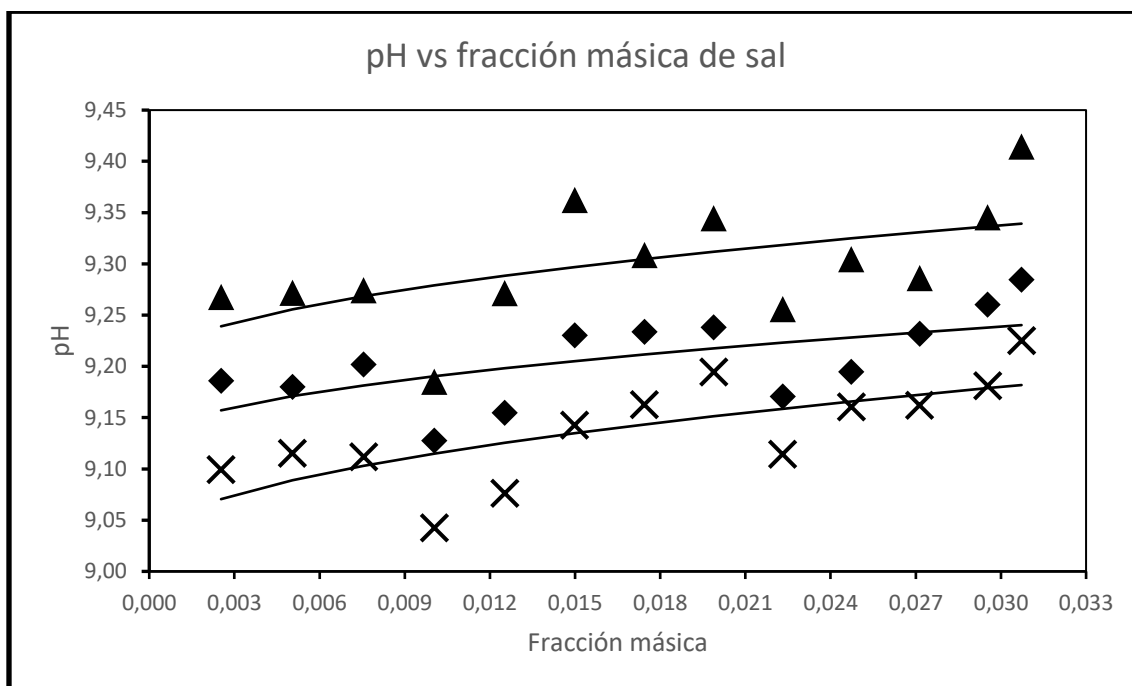


Figura 5-17 pH vs fracción málica de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ($\blacktriangle$: 25°C, $\blacklozenge$: 35°C, X: 45°C, línea cont.: Modelo).

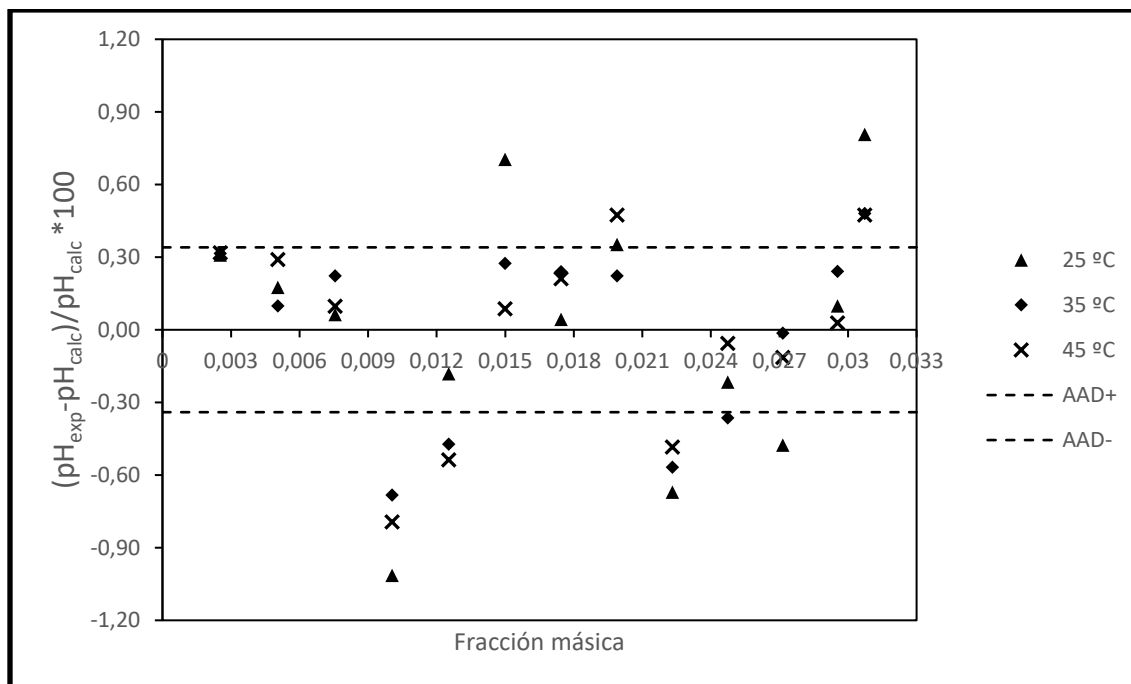


Figura 5-18 Dispersión de error de pH de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

5.2.4 Análisis de actividad de Agua

Finalmente, se realizaron los ajustes de los parámetros termodinámicos de Pitzer, por medio del método de los errores mínimos cuadráticos respecto a la actividad de agua experimental para todas las sales a 25°C, además de graficar el comportamiento de acuerdo con los parámetros obtenidos desde literatura [23], [25-26], [37-39], con las consideraciones explicadas en la sección 2.3, donde se encontraron bastantes diferencias respecto a estos parámetros, tanto experimental, como con el ajuste realizado. Como se observa en la Figura 5-19, Figura 5-21 y Figura 5-23, el comportamiento de actividad de agua decreciente es esperado, esto debido a que la actividad del agua es desplazada por la concentración del electrolito en solución, siendo mayor con el aumento de concentración, resultando en la disminución de la actividad del agua, además de un buen alineamiento con el punto de agua pura, donde la actividad esperada es 1. Respecto al comportamiento entre las actividades, se observó que la sal que más redujo la actividad en su rango de concentración fue el metaborato de litio coherentemente debido a la mayor solubilidad y, por lo tanto, mayor concentración, seguido por el tetraborato de sodio y finalmente la que tuvo menos influencia fue el tetraborato de litio. Se concluyó respecto a la diferencia entre estas últimas dos sales, que la razón es debido al efecto del catión, debido a que su masa atómica es mayor, genera una mayor influencia en la actividad de la solución, que la contraparte del catión de litio.

Las mayores diferencias de modelación en la actividad de tetraborato de litio con Zhang [37], puede deberse a la modificación del modelo de Pitzer con la utilización del parámetro β^2 y la modificación y ajuste del parámetro α_2 , además de utilizar molalidades sobresaturadas, superando el rango de solubilidad hasta 2.9397 [mol kg⁻¹]. Por otro lado, la mayor diferencia con la modelación del metaborato de litio,

según los parámetros reportados por Yang [23], se debe principalmente a que son parámetros reportados como la especie en solución $\text{LiB}(\text{OH})_4$, resultando en modificaciones tanto de su molalidad, como fuerza iónica y peso molecular asociada a este. Por último, las diferencias con los parámetros de Pitzer reportados por Cui [39], son similares al caso anterior, donde la especie de la cual se reportan los parámetros es $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_4$, citado de estudios referenciados de 1986 a los cuales no se pudo acceder en detalle.

Se observó con la, Figura 5-22 y Figura 5-24, que los datos no tienen un patrón de error y se encuentran en gran medida cercano o bajo la desviación media absoluta, por lo que los experimentos fueron realizados de buena manera.

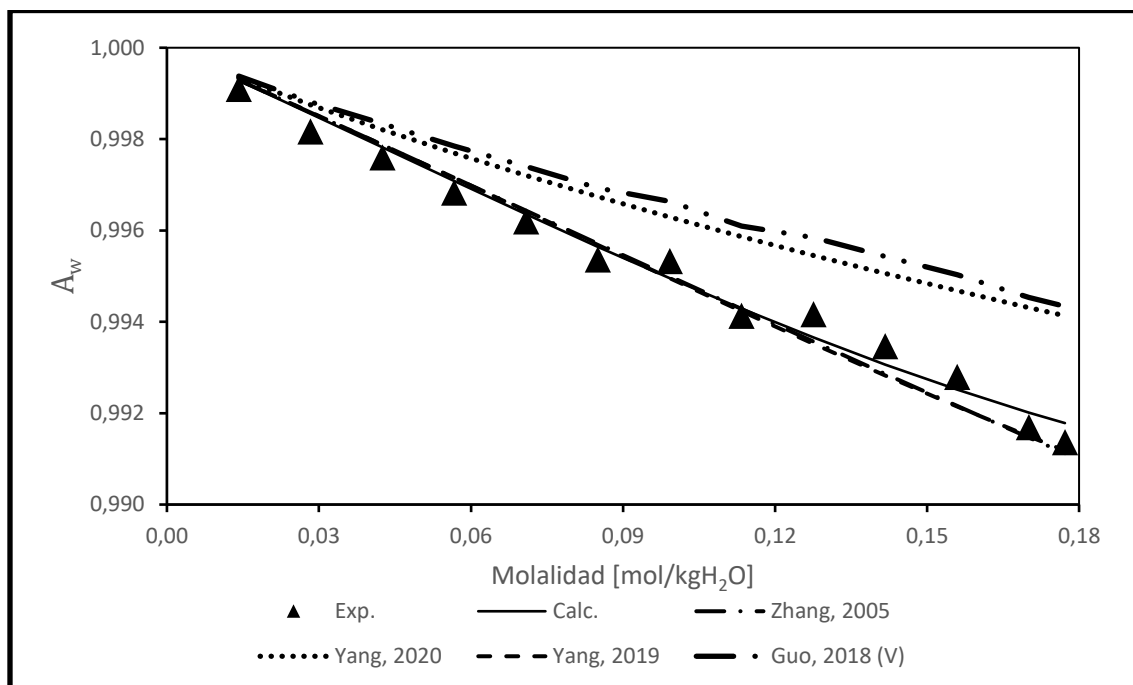


Figura 5-19 Actividad de agua vs molalidad de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

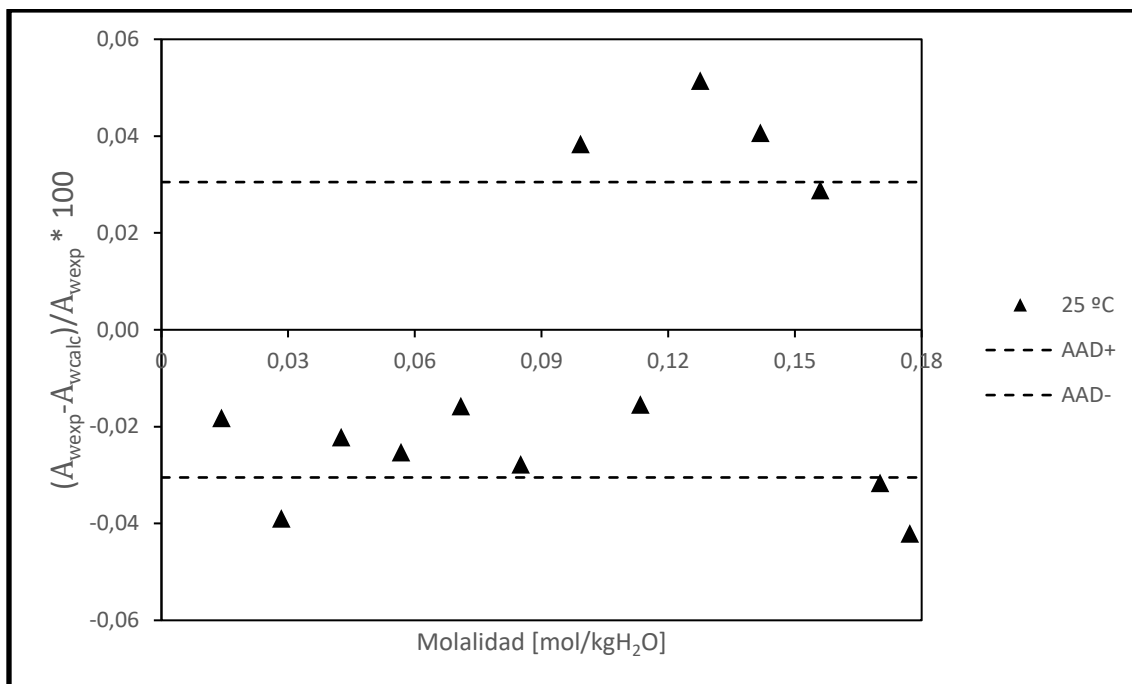


Figura 5-20 Dispersión de error de actividad de agua de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

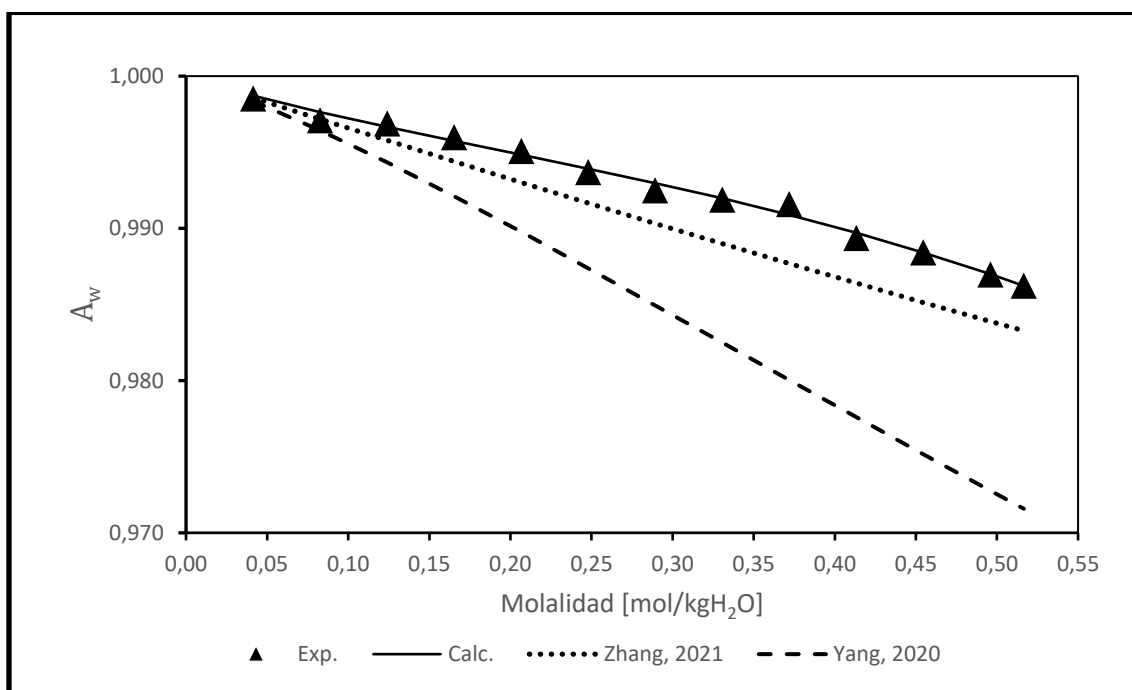


Figura 5-21 Actividad de agua vs molalidad de LiBO_2 .

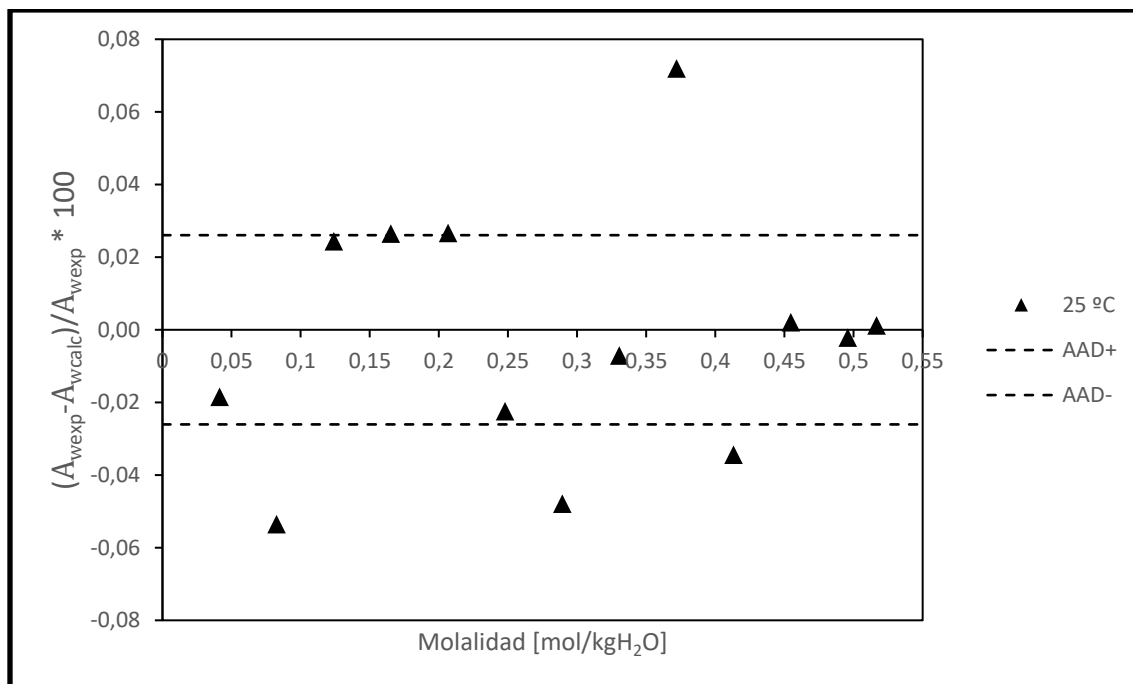


Figura 5-22 Dispersión de error de actividad de agua de LiBO_2 .

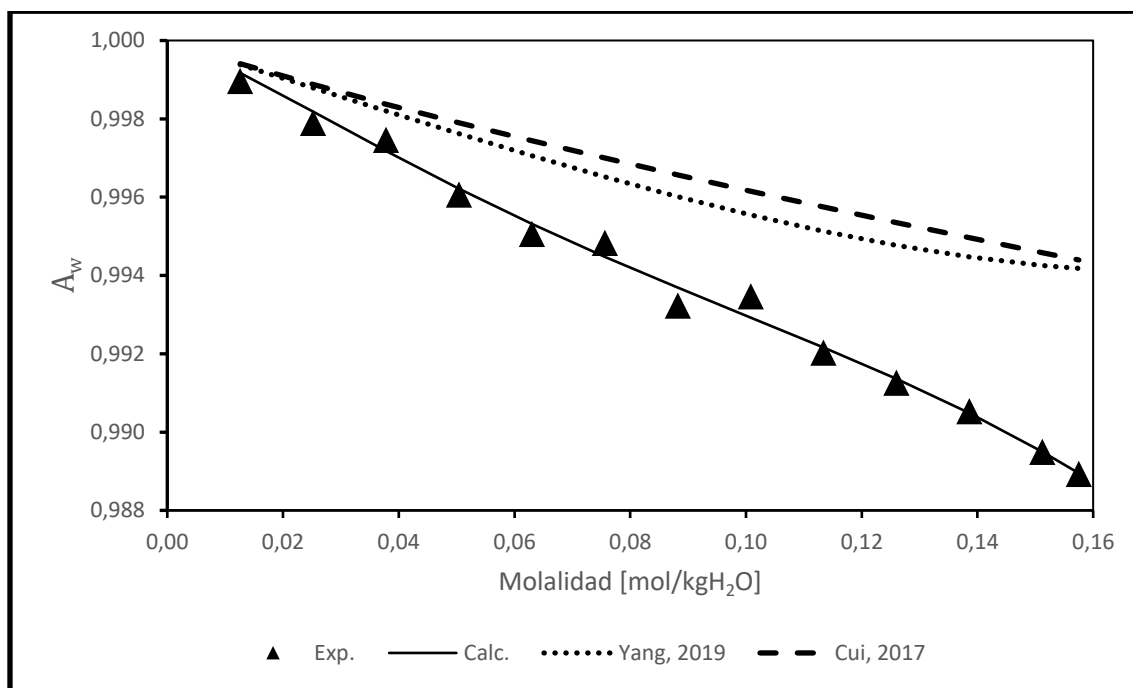


Figura 5-23 Actividad de agua vs molalidad de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

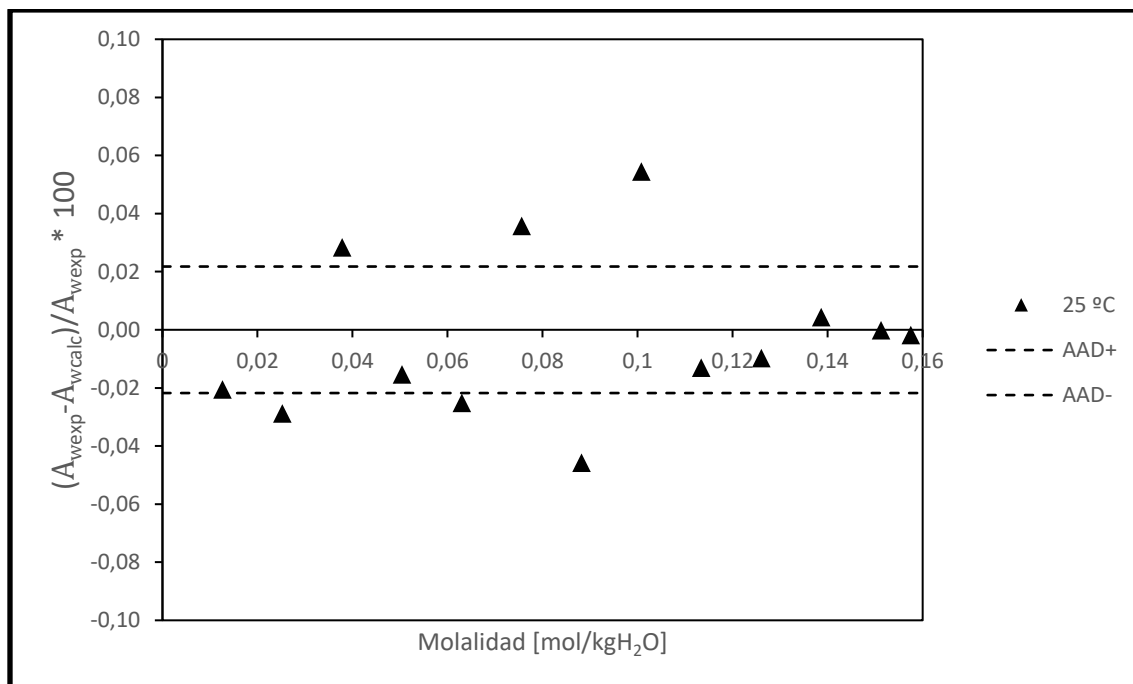


Figura 5-24 Dispersión de error de actividad de agua de Na₂B₄O₇.

5.3 Análisis del efecto de diferencia de catión vs efecto de diferencia de anión

Dada la similitud entre las sales de boratos, es posible compararlas a partir de un punto en común para el cambio de propiedades según su concentración, es por esto que realizó los gráficos comparativos de los sistemas, tomando el cambio de catión entre la sal Li₂B₄O₇, con la sal Na₂B₄O₇, y por otro lado el cambio de anión entre las sales Li₂B₄O₇ y LiBO₂, tal como muestran la Figura 5-25, la Figura 5-26 y la Figura 5-27, para densidad, conductividad y actividad de agua, respectivamente, donde se observó que para los tres casos el efecto de diferencia de anión presente, B₄O₇²⁻ o BO₂⁻ tiene un mayor efecto en cada propiedad. Para la propiedad de densidad y conductividad, el LiBO₂ a una misma fracción másica tiene una diferencia de densidad mayor que el Na₂B₄O₇ y esto debido a que el anión presente en el primer caso tiene un peso molecular significativamente menor que el segundo caso, 42.8 [g/mol] a 155.2 [g/mol], lo que implica una mayor adición de moles de borato a una misma fracción másica, por lo que un aumento de densidad y conductividad mayor debido a la cantidad de aniones en solución.

Por otro lado, para el efecto de diferencia de ion en actividad del agua, se realizó el análisis en concentración molar y se observó nuevamente que la diferencia de anión es mayor que la diferencia de catión, sin embargo, la actividad de agua aumenta en el primer caso, mientras que para el segundo disminuye. Esto se debe que las moléculas del catión BO₂⁻ tienen un área de superficie polar (PSA) [40-41] 2 veces menor que el catión B₄O₇²⁻, por lo que a una concentración similar de iones, genera una menor actividad que su contraparte con el anión tetraborato, lo cual es aún más notorio reemplazando el catión de Li⁺ por el catión Na⁺ generando una molécula de

mayor tamaño y generando una mayor actividad de la sal, como muestra la Figura 5-27 con la sal $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ con menor actividad de agua.

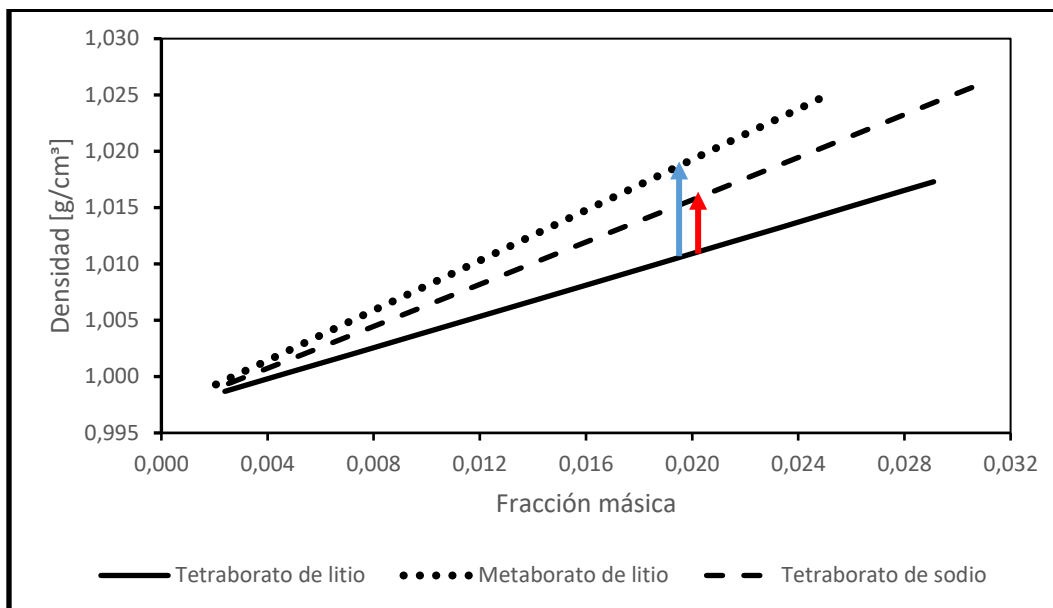


Figura 5-25 Gráfico comparativo de densidad de las sales $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, LiBO_2 y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C y la diferencia entre el efecto del catión (flecha roja) y el efecto del anión (flecha azul).

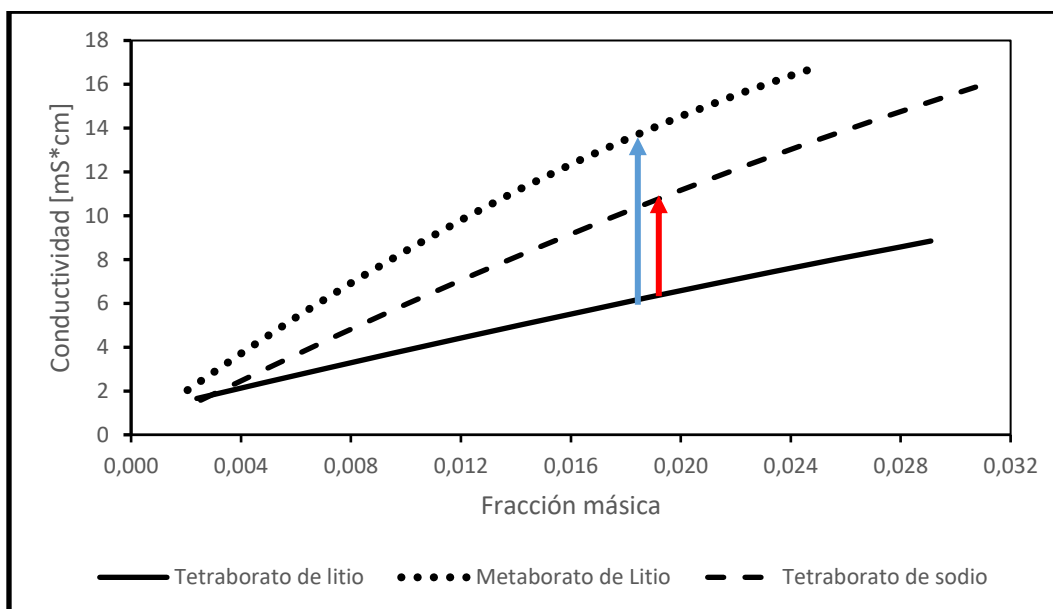


Figura 5-26 Gráfico comparativo de conductividad de las sales $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, LiBO_2 y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C y la diferencia entre el efecto del catión (flecha roja) y el efecto del anión (flecha azul).

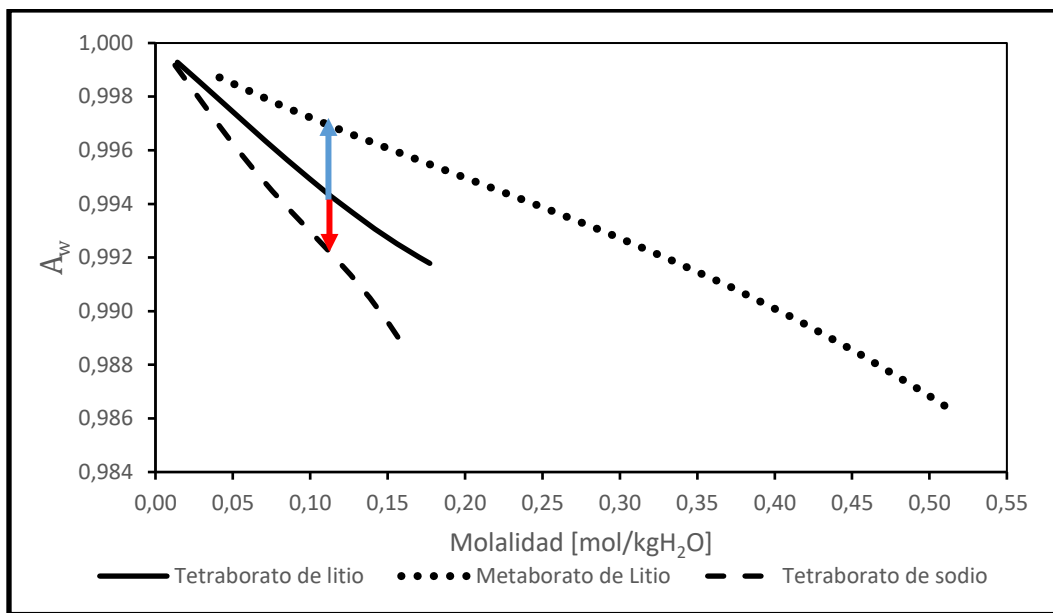


Figura 5-27 Gráfico comparativo de actividad de agua de las sales $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, LiBO_2 y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ a 25°C y la diferencia entre el efecto del catión (flecha roja) y el efecto del anión (flecha azul).

5.4 Resumen de Parámetros.

Con las modelaciones realizadas se obtuvieron los parámetros para cada propiedad de cada sal, los cuales están resumidos y tabulados en la Tabla 5-2, para los modelos empíricos de propiedades fisicoquímicas, con sus respectivas temperaturas, y en la Tabla 5-3, de los parámetros de Pitzer obtenidos a 25 °C.

Como se mencionó en la sección de revisión de modelos, los parámetros de Othmer son válidos para todas las temperaturas, mientras que los demás modelos son dependientes de esta y, finalmente, los parámetros de Pitzer sólo fueron modelados a la temperatura de 25°C, debido a limitaciones en la utilización del equipo de medición.

Tabla 5-2 Parámetros empíricos fisicoquímicos obtenidos para los sistemas $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$, $\text{LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$ y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ a 25, 35 y 45°C.

Sal	Temperatura °C	Othmer, Densidad			Claros, Conductividad				Claros, pH		
		A ₁	B ₁	AAD	E ₁	E ₂	E ₃	AAD	P ₁	P ₂	AAD
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	25	0,69172	0,17569	0,0152	0,939	51,166	-36,931	2,624	2724,52	0,63	0,079
	35				-0,012	80,773	-81,170		2803,58	-0,10	
	45				-0,062	89,547	-110,769		2889,95	-0,36	
LiBO_2	25	1,10451	0,81841	0,0108	0,189	45,817	-26,361	0,990	2991,13	1,80	0,114
	35				0,618	46,732	-26,699		3046,96	1,64	
	45				0,703	49,123	-28,838		3110,99	1,61	
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	25	0,934627	2,67342	0,0178	0,007	126,702	-164,955	1,414	2742,62	0,80	0,340
	35				-0,153	139,063	-220,627		2811,46	0,67	
	45				-0,169	154,829	-292,046		2871,53	0,89	

Tabla 5-3 Parámetros termodinámicos del modelo de Pitzer obtenidos para los sistemas $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$, $\text{LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$ y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ a 25°C.

Sal	Temperatura °C	Parámetros de Pitzer			
		β^0	β^1	C^ϕ	AAD
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	25	1,8719E-05	5,5329	-2,3212	0,0914
LiBO_2	25	1,8721E-05	-2,4229	0,6845	0,0604
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	25	-23,8187	63,9244	47,2076	0,0652

CAPÍTULO 6. MODELO PROPUESTO DE CRISTALIZACIÓN O PRECIPITACIÓN

Para la realización de la propuesta de cristalización de las sales estudiadas, se realizaron los cálculos de concentraciones elementales (Anexo 6) acordes al Salar de Atacama [36], obteniendo así 2 salmueras de sistemas ternarios, descritas en la tabla, las cuales se clasifican en 3 casos de estudios de acuerdo con sus diagramas de fases involucrados, enfocados en la precipitación de una de estas sales, partiendo de una base de cálculo de 1 [ton] de salmuera y adicionando distintas cantidades de cada sal anhidra al sistema para estudiar el comportamiento de cristalización por evaporación.

6.1 Caso 1: Sistema $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$, con precipitación de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

El primer sistema ternario combina dos de las sales involucradas en este estudio, por lo que inicialmente es enfocada en la precipitación del tetraborato de litio a partir de las concentraciones de la salmuera inicial, presentada en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1 Salmuera ideal de sistema $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$ calculada del Salar de Atacama [36].

Salmuera Ideal 1		
LiBO_2 [% peso]	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ [% peso]	H_2O [% peso]
0.0027463	0.000578905	99.9966747

A partir de esta salmuera y de acuerdo con el diagrama de fases postulado por Yang [23], se realiza el balance de masa para la recuperación del tetraborato de litio por evaporación de la salmuera y con adición 5 y 10 [g] de tetraborato anhidro (AD1 y AD2), los cuales modifican la pendiente de evaporación como se muestra en la Figura 6-1 desde 0.21 a 0.39 y 0.57, respectivamente, obteniendo los resultados de porcentaje de recuperación (Ecuación (24)), masa recuperada neta y masa de precipitado según la especie (Tabla 6-2).

Se observó que a medida que se aumenta la adición de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ la recuperación disminuye, es decir la adición de esta sal en el sistema genera una disminución de la recuperación, pudiendo ser incluso una pérdida como en AD2, donde la masa de sal precipitada es menor a la masa agregada de sal.

Tabla 6-2 Resultados de precipitación de tetraborato de litio.

Camino	Adición	Masa adicional [g]	Masa Precipitado [g]	Masa Anhidra [g]	Recuperación neta [%]	Recuperación neta [g]	Precipitado
Evaporación	No	0	3,028	1,740	30,051	1,740	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
AD1	Tetraborato	5,00	9,625	5,530	4,909	0,530	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
AD2	Tetraborato	10,00	16,221	9,319	-4,310	-0,681	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

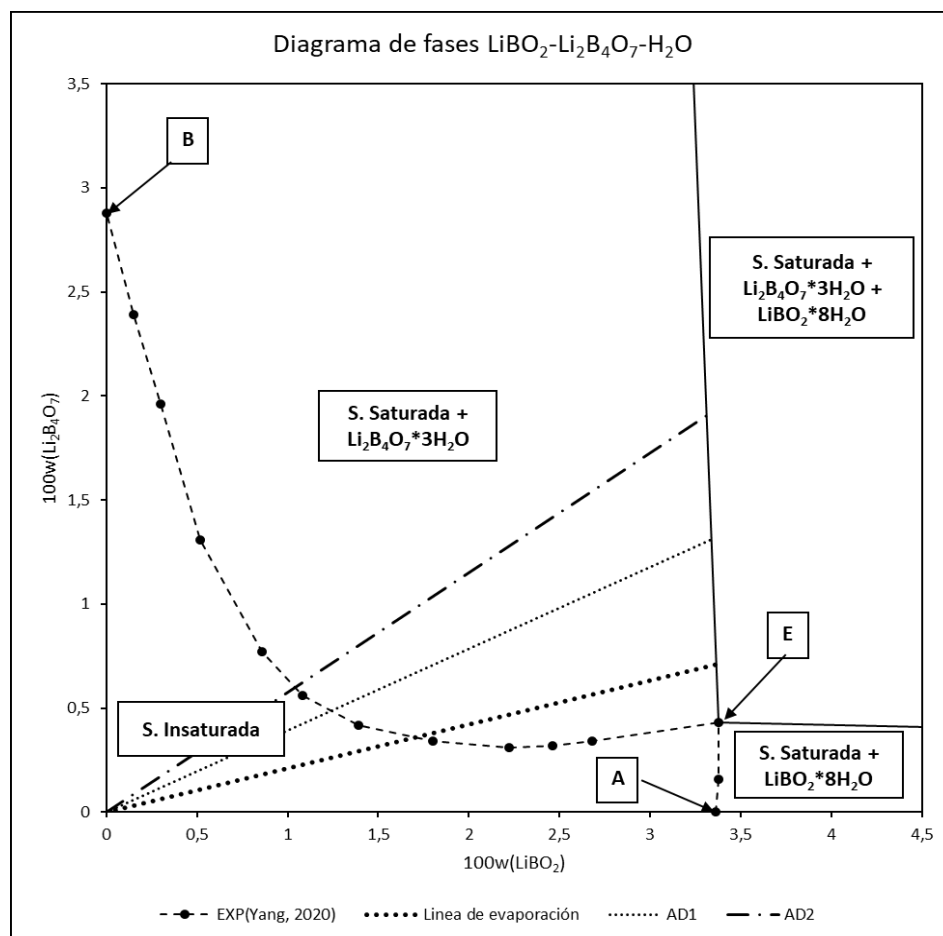


Figura 6-1 Líneas de evaporación de tetraborato de litio a distintas razones en el diagrama de fases ternario $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$.

6.2 Caso 2: Sistema $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$, con precipitación de LiBO_2 .

Al igual que el primer caso y a partir de la salmuera descrita en la Tabla 6-1 en conjunto con el diagrama de fases presentado anteriormente, se realizaron los cálculos necesarios para modificar la salmuera a tal razón entre las sales que alcance el punto eutéctico del sistema (AD3), donde no genera una posible separación entre una sal y otra. Luego, se realizan los cálculos a adiciones de metaborato de litio superiores donde se encuentra un precipitado de esta sal hidratada, como muestra la Tabla 6-3.

Se observó que la recuperación neta alcanza el valor 0 con una adición de 215.94 [g] de sal anhidra (AD5), es decir, la masa precipitada en su forma anhidra es igual a la adicionada de LiBO_2 , por lo que para obtener una recuperación positiva es necesario agregar más sal que esto.

Tabla 6-3 Resultados de precipitación de metaborato de litio.

Camino	Adición	Masa adicional [g]	Masa Precipitado [g]	Masa Anhidra [g]	Recuperación neta [%]	Recuperación neta [g]	Precipitado
Evaporación	No	0	3,028	1,740	30,051	1,740	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
AD3	Metaborato	18,04	0,002	0,000	-39,648	-18,042	Nada
AD4	Metaborato	50,00	124,461	8,206	-53,953	-41,794	$\text{LiBO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
AD5	Metaborato	215,94	3275,065	215,940	0,000	0,000	$\text{LiBO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

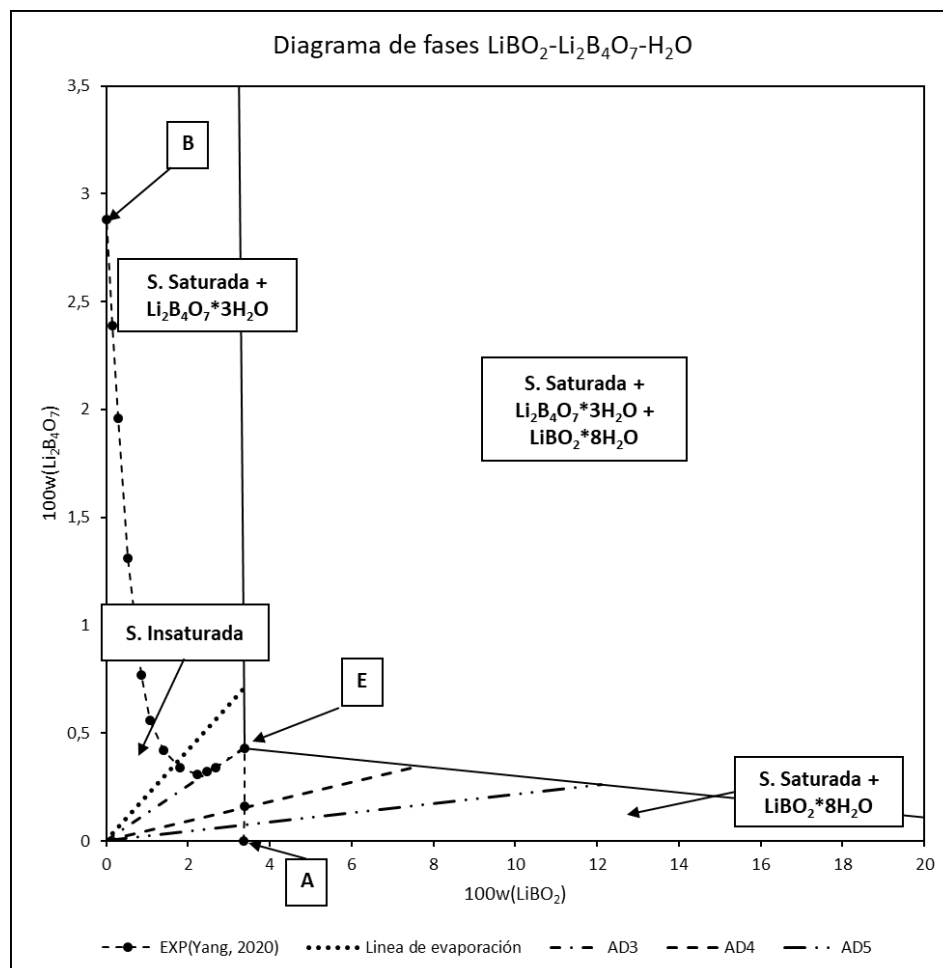


Figura 6-2 Líneas de evaporación de metaborato de litio a distintas razones en el diagrama de fases ternario $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$.

6.3 Caso 3: Sistema $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-NaCl-H}_2\text{O}$, con precipitación de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

Para el tercer sistema ternario que involucra una sal estudiada, se realizó un nuevo cálculo de salmuera ideal a partir de los balances moleculares del Salar de Atacama [36], en la cual se obtuvieron las concentraciones de tetraborato de sodio y cloruro de sodio descritos en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4 Salmuera ideal de sistema $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ calculada del Salar de Atacama [36].

Salmuera Ideal 2		
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ [% peso]	NaCl [% peso]	H_2O [% peso]
0.003466048	0.12185569	99.87468

A partir del diagrama de fases postulado por Yang [25], se realizaron los balances de masa desde la evaporación pura de la salmuera, con adición necesaria para el punto eutéctico de 0.799 [g] de tetraborato de sodio, y aumentos de 5, 10 y 20 [g] de tetraborato de sodio, obteniendo así la cantidad de masa precipitada, la recuperación neta y recuperación porcentual, como muestra la Tabla 6-5.

Tabla 6-5 Resultados de precipitación de tetraborato de sodio.

Camino	Adicion	Masa adicional [g]	Masa Precipitado [g]	Masa Anhidra [g]	Recuperación neta [%]	Recuperación neta [g]	Precipitado
Secado	No	0	1,176	0,328	0,946	0,328	NaCl
AD1	Tetraborato	0,799	0,000	0,000	-2,253	-0,799	Nada
AD2	Tetraborato	5,00	7,959	2,217	-7,016	-2,783	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
AD3	Tetraborato	10,00	17,432	4,857	-11,517	-5,143	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
AD4	Tetraborato	20,00	36,377	10,135	-18,048	-9,865	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

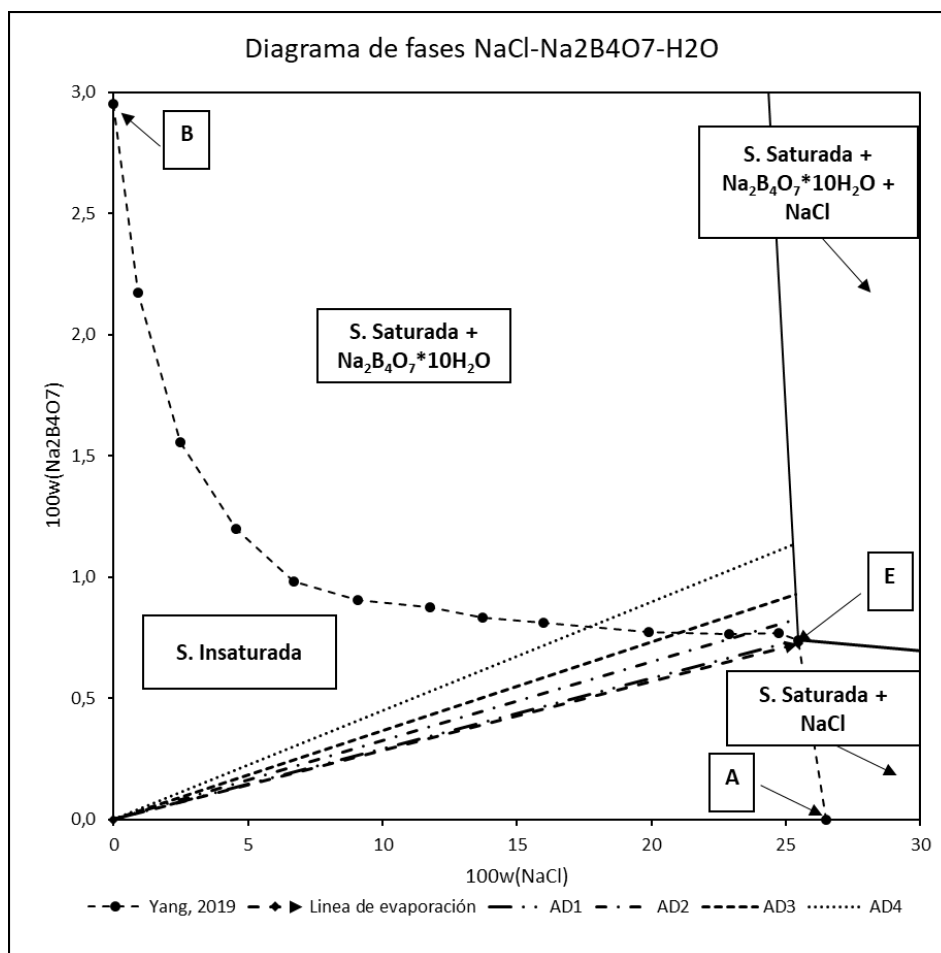


Figura 6-3 Líneas de evaporación de tetraborato de sodio a distintas razones en el diagrama de fases ternario NaCl-Na₂B₄O₇-H₂O.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Se realizaron los ajustes de propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de los sistemas $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$, $\text{LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$ y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ en rangos insaturados obteniendo una baja desviación media para los primeros, utilizando la regla de Othmer para la densidad y los modelos de Claros para la conductividad y pH, resultando así en los parámetros asociados a los modelos para 25, 35 y 45°C con buen acuerdo a los datos experimentales, concluyendo que para todos los sistemas la densidad disminuye con el aumento de la temperatura debido a la expansión volumétrica de las moléculas, generando que el tetraborato de sodio tenga la mayor disminución, y aumenta con el aumento de concentración, mientras que para la conductividad tanto el aumento de concentración, como de la temperatura, genera un aumento de la conductividad del sistema, siendo el tetraborato de sodio quien tuvo un aumento más significativo, aumentando hasta 8.48 veces su conductividad debido a la concentración, seguido por el tetraborato de litio con 8.41 veces y finalmente, el metaborato de litio con 7.22 veces. Los aumentos por temperatura no supera el 13.23% en promedio, por lo que no es comparativamente significativo. El comportamiento del pH para todas las sales fue relativamente lineal, con un aumento máximo de 0.2 por concentración, sin embargo, se observa que la temperatura en todos los sistemas genera un movimiento de los equilibrios de los boratos pudiendo generar ácido bórico en el sistema lo que explica la disminución de pH por temperatura. Además, se realizaron los ajustes de actividad de agua de los sistemas a 25°C en base al modelo de Pitzer obteniendo los parámetros con una desviación media menor a 0.55% respecto a los resultados experimentales, los cuales fueron comparados con los parámetros de la literatura obtenidos por medio de deducciones a partir de sistemas ternarios, encontrando discordancia con estos, atribuidos a modificaciones realizadas al modelo utilizado y cambios en la especie para la cual se reporta en el sistema.

Por otro lado, se realizaron pruebas de equilibrio de los tres sistemas a 25°C obteniendo un máximo de 28.02, 33.47 y 26.26 [g/L] para el tetraborato de litio, metaborato de litio y tetraborato de sodio, respectivamente, por medio de medición de densidad, hasta obtener una medición constante en más de una ocasión y realizando el análisis por absorción atómica correspondiente.

Finalmente, a partir de diagramas ternarios de sistemas que involucren las sales y la aproximación de una salmuera del Salar de atacama, se proponen procesos de precipitación de las sales, donde se concluye que para la precipitación de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ en el sistema $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$, la mayor recuperación se obtiene por medio del secado puro, con precipitación neta decreciente por medio de la adición de la sal anhidra, mientras que para la precipitación de $\text{LiBO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ se obtiene que tiene una precipitación neta creciente con la adición de sal anhidra y la recuperación es positiva a partir de una razón de porcentaje en peso $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7/\text{LiBO}_2$ de 0.02378. Para el sistema de $\text{NaCl-Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ se obtiene que, a partir de la salmuera inicial, la precipitación de secado puro conlleva la precipitación de NaCl, mientras que la precipitación de $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ no es viable mediante la adición de sal anhidra al sistema, siendo la recuperación neta decreciente en todas las modificaciones.

Se recomienda para futuros estudios ampliar las mediciones de actividad de agua para los sistemas de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$, $\text{LiBO}_2\text{-H}_2\text{O}$ y $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ a 35 y 45°C, además de realizar la conciliación de parámetros de Pitzer con los encontrados en literatura desde sistemas ternarios. Además, validar la predicción del modelo de Pitzer mediante la cristalización controlada de estos sistemas de boratos y estudiar el efecto de la interacción de los boratos con distintos aniones y su efecto en la estructura del solvente.

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

- [1] A. González, “El mercado de litio Desarrollo reciente y proyecciones al 2030,” 2021.
- [2] P. Lopez and I. Garcés, “Evolución química de las salmueras del Salar de Huasco (Chile) en condiciones experimentales controladas,” *Revista Real Academia de Ciencias*, vol. 57, pp. 201–209, 2002.
- [3] M. Dry, “Extraction of Lithium from Brine—Old and New Chemistry,” 2018, pp. 2225–2234. doi: 10.1007/978-3-319-95022-8_187.
- [4] Banco Central de Chile, “Indicadores de comercio exterior, tercer trimestre 2024,” 2024.
- [5] U. S. Geological Survey, “MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2024,” 2024.
- [6] PubChem, “LITHIUM TETRABORATE - PubChem.” Accessed: Jun. 03, 2023. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/15764247#section=Use-and-Manufacturing>
- [7] PubChem, “SODIUM TETRABORATE - PubChem.” Accessed: Jun. 03, 2023. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/10219853#section=Use-and-Manufacturing>
- [8] PubChem, “LITHIUM METABORATE - PubChem.” Accessed: Jun. 03, 2023. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/123308#section=Literature>
- [9] W. Xiang, S. Liang, Z. Zhou, W. Qin, and W. Fei, “Extraction of lithium from salt lake brine containing borate anion and high concentration of magnesium,” *Hydrometallurgy*, vol. 166, pp. 9–15, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.hydromet.2016.08.005.
- [10] Observatory of Economic Complexity, “OEC - Oxides of borons, boric acids.” Accessed: Jun. 03, 2023. [Online]. Available: <https://oec.world/en/profile/hs/oxides-of-boron-boric-acids#:~:text=In%202021%2C%20Oxides%20of%20boron,0.000026%25%20of%20total%20world%20trade.>
- [11] SigmaAldrich, “Boric Acid - Sigma Aldrich.” Accessed: Jun. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.sigmaaldrich.com/US/en/search/boric-acid?facet=facet_related_category%3AAcids&focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=boric%20acid&type=product
- [12] SigmaAldrich, “Sodium tetraborate - Sigma Aldrich.” Accessed: Jun. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.sigmaaldrich.com/US/en/search/sodium-tetraborate?facet=facet_related_category%3ASalts&focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=sodium%20tetraborate&type=product
- [13] SigmaAldrich, “Lithium tetraborate - Sigma Aldrich.” Accessed: Jun. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.sigmaaldrich.com/US/en/search/lithium-tetraborate?facet=facet_related_category%3AHigh-Purity%20Salts&focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=lithium%20tetraborate&type=product

- [14] SigmaAldrich, "Lithium metaborate - Sigma Aldrich." Accessed: Jun. 03, 2023. [Online]. Available: https://www.sigmaaldrich.com/US/en/search/lithium-metaborate?facet=facet_related_category%3AHigh-Purity%20Salts&focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=lithium%20metaborate&type=product
- [15] K. S. (Kenneth S. Pitzer, *Activity coefficients in electrolyte solutions*. 2018.
- [16] K. Thomsen, "Electrolyte Solutions: Thermodynamics, Crystallization, Separation methods," 2009, doi: 10.11581/dtu:00000073.
- [17] F. Balderrama, "Predicción de la solubilidad del $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ utilizando el modelo de Pitzer," Dec. 2016.
- [18] D. P. Fernández, A. R. H. Goodwin, E. W. Lemmon, J. M. H. Levelt Sengers, and R. C. Williams, "A formulation for the static permittivity of water and steam at temperatures from 238 K to 873 K at pressures up to 1200 MPa, including derivatives and Debye-Hückel coefficients," *J Phys Chem Ref Data*, vol. 26, no. 4, pp. 1125–1166, 1997, doi: 10.1063/1.555997.
- [19] K. S. Pitzer and G. Mayorga, "Thermodynamics of Electrolytes. I. Activity and Osmotic Coefficients for Strong Electrolytes with One or Both Ions Univalent," 1973.
- [20] Y. Guo, L. Li, L. Cao, X. Yu, S. Wang, and T. Deng, "Solubilities, densities and refractive indices in the aqueous quaternary system of lithium sulfate, lithium metaborate, and lithium carbonate at 288.15, 298.15, 308.15 K and 0.1 MPa," *J Chem Eng Data*, vol. 62, no. 1, pp. 508–515, Jan. 2017, doi: 10.1021/acs.jced.6b00777.
- [21] M. Claros, M. E. Taboada, H. R. Galleguillos, and Y. P. Jimenez, "Physicochemical Properties of $\text{CuSO}_4 + \text{PEG 4000} + \text{H}_2\text{O}$ Solutions at Different Temperatures," *Int J Thermophys*, vol. 37, no. 8, Aug. 2016, doi: 10.1007/s10765-016-2089-2.
- [22] M. Lingzong, "Solubility Prediction for $\text{LiCl-Li}_2\text{SO}_4\text{-Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ System at 298.15 K Using Ion-Interaction Model," 2012.
- [23] L. Yang *et al.*, "Solubility determination and thermodynamic modeling of solid-liquid equilibria in the $\text{LiBO}_2\text{-Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ system at 298.15 K and 323.15 K," *Fluid Phase Equilib*, vol. 523, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.fluid.2020.112783.
- [24] P. Wang, J. J. Kosinski, M. M. Lencka, A. Anderko, and R. D. Springer, "Thermodynamic modeling of boric acid and selected metal borate systems," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 85, no. 11, pp. 2117–2144, 2013, doi: 10.1351/PAC-CON-12-07-09.
- [25] L. Yang, L. Meng, T. Ge, D. Li, T. Deng, and Y. Guo, "Solubility Measurement and Thermodynamic Modeling of Solid-Liquid Equilibria in the $\text{MCl-M}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ (M = Li, Na) Systems," *J Chem Eng Data*, vol. 64, no. 10, pp. 4510–4517, Oct. 2019, doi: 10.1021/acs.jced.9b00561.
- [26] Y. Guo *et al.*, "Volumetric properties of aqueous solution of lithium tetraborate from 283.15 to 363.15 K at 101.325 kPa," *Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 120, pp. 151–156, May 2018, doi: 10.1016/j.jct.2018.01.018.
- [27] LTS Research Laboratories, "Lithium Borate Safety Data Sheet," 2015.
- [28] W. M. Haynes, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 92nd ed. 2011.

- [29] W. T. Reburn and W. A. Gale, "THE SYSTEM LITHIUM OXIDE-BORIC OXIDE-WATER," 1955.
- [30] C. González, "OPERACIÓN DENSÍMETRO DIGITAL DMA 1001 ANTON PAAR Laboratorio de Procesamiento de Minerales."
- [31] C. González, "OPERACIÓN MEDIDOR DE LABORATORIO DE SOBREMESA PARA MEDCIÓN DE CONDUCTIVIDAD Laboratorio de Procesamiento de Minerales."
- [32] C. González, "OPERACIÓN MEDIDOR DE LABORATORIO DE SOBREMESA APLICACIÓN MEDICIÓN DE PH."
- [33] C. González, "OPERACIÓN BAÑO DE RECIRCULACIÓN."
- [34] C. González, "OPERACIÓN INCUBADORA DE HIBRIDACIÓN COMBI-12 Versión: 1 Laboratorio de Procesamiento de Minerales."
- [35] Novasina, "LabMaster-aw-neo_EN Specification Sheet".
- [36] F. Risacher and H. Alonso, "Geoquímica del Salar de Atacama, Parte 2: Evolución de las aguas.," *Revista geológica de Chile*, vol. 23, no. 2, pp. 123–134, 1996.
- [37] A. Y. Zhang, Y. Yao, L. J. Li, and P. S. Song, "Isopiestic determination of the osmotic coefficients and Pitzer model representation for $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{aq})$ at $T=298.15\text{ K}$," *Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 37, no. 2, pp. 101–109, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.jct.2004.07.028.
- [38] N. Zhang, Y. Guo, Y. Yuan, S. Wang, and T. Deng, "Thermodynamic phase equilibria of the aqueous ternary system ($\text{LiCl}+\text{LiBO}_2+\text{H}_2\text{O}$) at 308 K: Experimental data and predictions using the pitzer model," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 49, no. 4, pp. 324–331, Apr. 2016, doi: 10.1252/jcej.15we045.
- [39] "Cui, 2017. Pase equilibrium parameters $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 - \text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7\ldots$ ".
- [40] PubChem, "Borate ion Computed Properties." Accessed: Jan. 08, 2025. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Borate-ion#section=Computed-Properties>
- [41] PubChem, "Borate BO_2^- Computed Properties." Accessed: Jan. 08, 2025. [Online]. Available: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Borate-_BO21#section=Computed-Properties

ANEXOS

	Spec. Values	
Assay (acidimetric)	≥ 98.0	%
Chloride (Cl)	≤ 0.005	%
Phosphate (PO_4)	≤ 0.002	%
Sulfate (SO_4)	≤ 0.005	%
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.005	%
Ca (Calcium)	≤ 0.005	%
Fe (Iron)	≤ 0.001	%
K (Potassium)	≤ 0.005	%
Mg (Magnesium)	≤ 0.001	%
Na (Sodium)	≤ 0.005	%

Anexo 1 Especificación de composición de Tetraborato de litio, obtenida de laboratorios Merck.

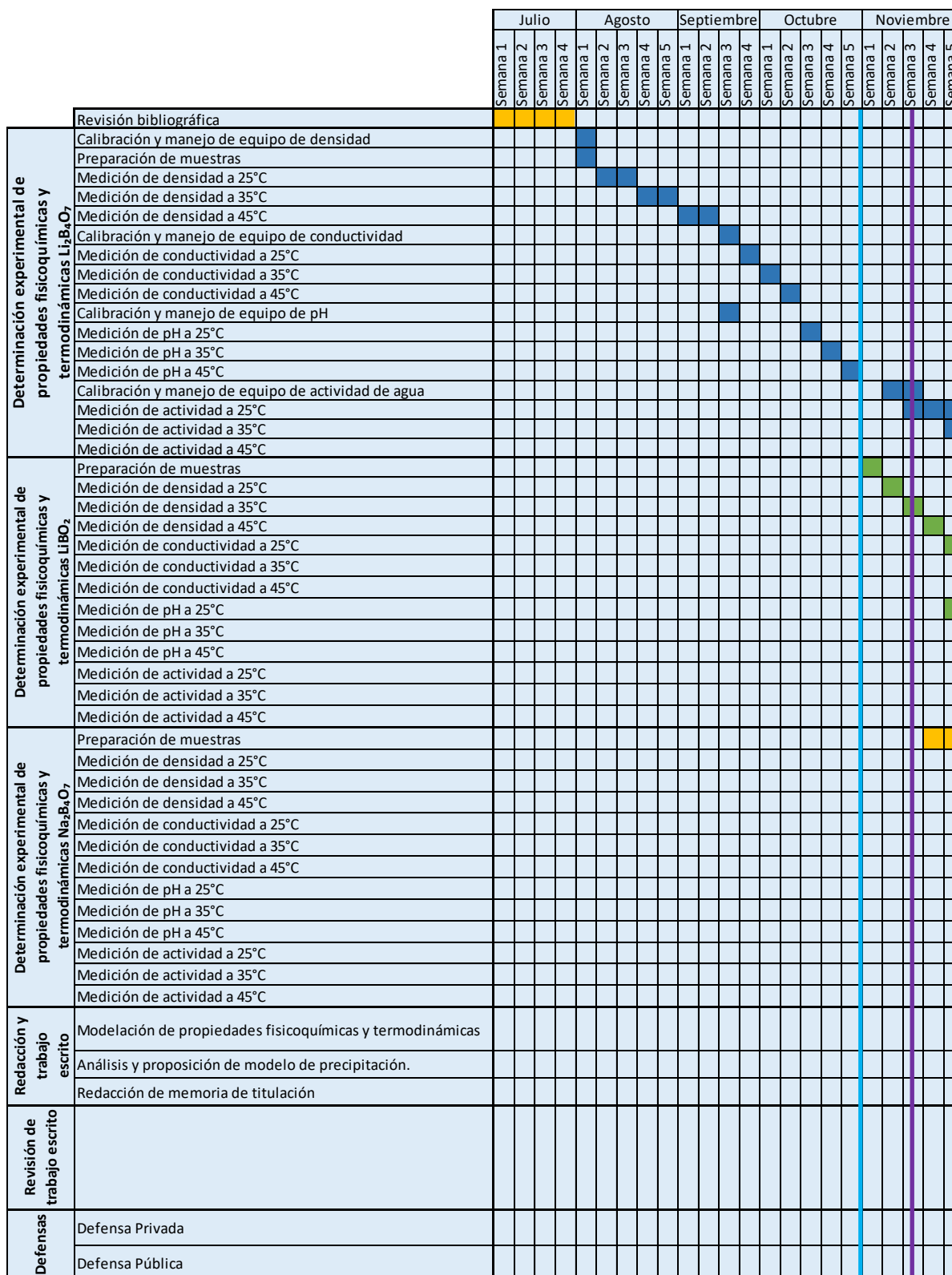
	Spec. Values	
Assay (acidimetric)	≥ 98.0	%
Chloride (Cl)	≤ 0.001	%
Phosphate (PO_4)	≤ 0.002	%
Sulfate (SO_4)	≤ 0.005	%
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.002	%
Ca (Calcium)	≤ 0.005	%
Fe (Iron)	≤ 0.001	%

Anexo 2 Especificación de composición de Tetraborato de Sodio, obtenida de laboratorios Merck.

Spec. Values		
Chloride (Cl)	≤ 50	ppm
Phosphate (PO ₄)	≤ 20	ppm
Silicate (SiO ₂)	≤ 100	ppm
Sulfate (SO ₄)	≤ 50	ppm
Ag (Silver)	≤ 5	ppm
Al (Aluminium)	≤ 10	ppm
Ba (Barium)	≤ 5	ppm
Ca (Calcium)	≤ 20	ppm
Cd (Cadmium)	≤ 5	ppm
Co (Cobalt)	≤ 5	ppm
Cr (Chromium)	≤ 5	ppm
Cu (Copper)	≤ 5	ppm
Fe (Iron)	≤ 20	ppm
Ga (Gallium)	≤ 5	ppm
K (Potassium)	≤ 10	ppm
Mg (Magnesium)	≤ 10	ppm
Mn (Manganese)	≤ 5	ppm
Na (Sodium)	≤ 20	ppm
Ni (Nickel)	≤ 5	ppm
Pb (Lead)	≤ 5	ppm
Sr (Strontium)	≤ 5	ppm
Zn (Zinc)	≤ 5	ppm
Loss on ignition (800 °C)	≤ 1.0	%
Bulk density	about 130	g/100 ml

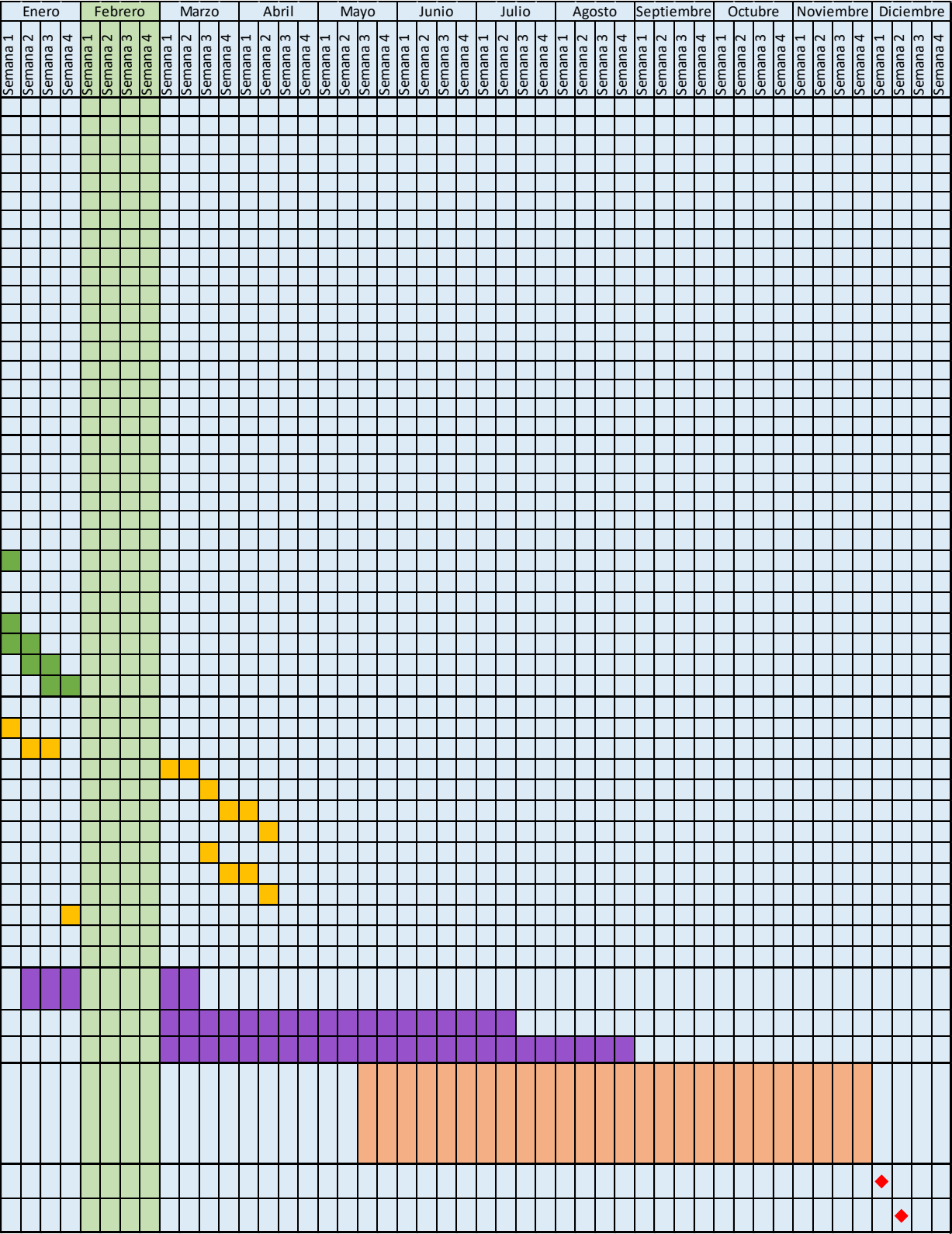
Anexo 3 Especificación de composición de Metaborato de litio, obtenida de laboratorios Merck.

DETERMINACIÓN Y MODELACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y FISICOQUÍMICAS DE SOLUCIONES DE TETRABORATO DE LITIO, TETRABORATO DE SODIO Y METABORATO DE LITIO A 25, 35 Y 45°C



Anexo 4 Carta Gantt del proyecto año 2023.

DETERMINACIÓN Y MODELACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y FISICOQUÍMICAS DE SOLUCIONES DE TETRABORATO DE LITIO, TETRABORATO DE SODIO Y METABORATO DE LITIO A 25, 35 Y 45°C



Anexo 5 Carta Gantt del proyecto año 2024.

DETERMINACIÓN Y MODELACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y FISICOQUÍMICAS DE SOLUCIONES DE TETRABORATO DE LITIO, TETRABORATO DE SODIO Y METABORATO DE LITIO A 25, 35 Y 45°C

Numero	Densidad [g/ml]	B [mg/l]	Na [mg/l]	Li [mg/l]	Cl [mg/l]	Sol [g]	H2O [g]	B [%]	Na [%]	Li [%]	Cl [%]	H2O [%]
ATA-1	1,001	0,530	258,0	0,038	419,0	1001	1000,322	0,0000529	0,0257742	0,0000038	0,0418581	99,9323
ATA-2	1,000	0,454	57,5	0,031	82,4	1000	999,860	0,0000454	0,0057500	0,0000031	0,0082400	99,9860
ATA-3	1,001	1,550	191,0	0,160	252,0	1001	1000,555	0,0001548	0,0190809	0,0000160	0,0251748	99,9556
ATA-4	1,001	1,650	396,0	0,347	604,0	1001	999,998	0,0001648	0,0395604	0,0000347	0,0603397	99,8999
ATA-5	1,001	19,500	520,0	4,440	959,0	1001	999,497	0,0019481	0,0519481	0,0004436	0,0958042	99,8499
ATA-6	1,000	1,100	40,9	0,118	53,3	1000	999,905	0,0001100	0,0040900	0,0000118	0,0053300	99,9905
ATA-7	1,001	20,100	271,0	1,490	302,0	1001	1000,405	0,0020080	0,0270729	0,0001489	0,0301698	99,9406
ATA-8	1,000	2,780	81,0	0,222	72,1	1000	999,844	0,0002780	0,0081000	0,0000222	0,0072100	99,9844
ATA-9	1,000	1,500	48,3	0,153	44,4	1000	999,906	0,0001500	0,0048300	0,0000153	0,0044400	99,9906
ATA-10	1,001	5,500	260,0	0,666	231,0	1001	1000,503	0,0005495	0,0259740	0,0000665	0,0230769	99,9503
ATA-11	1,000	2,120	101,0	0,250	88,8	1000	999,808	0,0002120	0,0101000	0,0000250	0,0088800	99,9808
ATA-12	1,002	10,000	469,0	0,541	888,0	1002	1000,632	0,0009980	0,0468064	0,0000540	0,0886228	99,8635
ATA-13	1,002	10,100	764,0	1,090	1530,0	1002	999,695	0,0010080	0,0762475	0,0001088	0,1526946	99,7699
ATA-14	1,001	11,700	361,0	2,520	547,0	1001	1000,078	0,0011688	0,0360639	0,0002517	0,0546454	99,9079
ATA-15	1,001	12,000	299,0	2,480	533,0	1001	1000,154	0,0011988	0,0298701	0,0002478	0,0532468	99,9154
ATA-16	1,001	11,600	352,0	2,580	533,0	1001	1000,101	0,0011588	0,0351648	0,0002577	0,0532468	99,9102
ATA-17	1,000	2,150	112,0	0,423	124,0	1000	999,761	0,0002150	0,0112000	0,0000423	0,0124000	99,9761
ATA-18	1,000	0,432	32,4	0,126	17,0	1000	999,950	0,0000432	0,0032400	0,0000126	0,0017000	99,9950
ATA-19	1,002	3,740	292,0	0,153	373,0	1002	1001,331	0,0003733	0,0291417	0,0000153	0,0372255	99,9332
ATA-20	1,015	33,900	5410,0	71,500	10800,0	1015	998,685	0,0033399	0,5330049	0,0070443	1,0640394	98,3926
ATA-21	1,002	9,570	545,0	4,960	898,0	1002	1000,542	0,0009551	0,0543912	0,0004950	0,0896208	99,8545
ATA-22	1,003	13,400	1070,0	13,300	1880,0	1003	1000,023	0,0013360	0,1066800	0,0013260	0,1874377	99,7032
ATA-23	1,000	5,340	207,0	1,090	275,0	1000	999,512	0,0005340	0,0207000	0,0001090	0,0275000	99,9512
ATA-24	1,000	0,097	13,3	0,090	1,5	1000	999,985	0,0000097	0,0013300	0,0000090	0,0001460	99,9985
ATA-25	1,002	6,090	124,0	0,023	155,0	1002	1001,715	0,0006078	0,0123752	0,0000023	0,0154691	99,9715
Promedio								0,0007448	0,0487399	0,0004307	0,0859407	99,8641

Anexo 6 Tabla de concentración elemental de Salar de Atacama.