



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO Y COMPORTAMIENTO DE LA INTERFAZ SALINA EN
MEDIOS POROSOS CONSIDERANDO DENSIDAD VARIABLE. CASO
ESTUDIO: ACUÍFERO DEL SALAR DE ATACAMA, II REGIÓN DE
ANTOFAGASTA, CHILE

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN RECURSOS Y
MEDIO AMBIENTE HÍDRICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

BASTIÁN ALEXIS GUTIÉRREZ BAEZA

PROFESOR GUÍA:
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JULIO CORNEJO MORALES
SARAH LERAY

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE: Ingeniero Civil y grado de Magíster en Ciencias de la
Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico
POR: Bastián Alexis Gutiérrez Baeza
FECHA: 28/02/2020
PROFESOR GUÍA: Carlos Espinoza Contreras

**ESTUDIO Y COMPORTAMIENTO DE LA INTERFAZ SALINA EN
MEDIOS POROSOS CONSIDERANDO DENSIDAD VARIABLE. CASO
ESTUDIO: ACUÍFERO DEL SALAR DE ATACAMA, II REGIÓN DE
ANTOFAGASTA, CHILE**

El presente trabajo se enfoca en la modelación numérica de medios porosos que poseen aguas con una diferencia de densidad considerable, donde se genera una interfaz salina la cual es estudiada y analizada, determinando su comportamiento frente a la variación de diferentes parámetros que condicionan la dinámica de este fenómeno.

Para ello, y basándose en experiencias previas en lo que respecta a modelación de flujo considerando densidad variable, se construyeron modelos hipotéticos mediante el software Groundwater Modeling System (GMS) y utilizando el código SEAWAT para la resolución de las ecuaciones, determinando en una primera parte los alcances en el proceso de construcción del modelo, para posteriormente estudiar el comportamiento de la interfaz salina.

Al obtener un estudio acabado del funcionamiento de estos sistemas, se procede a la aplicación de estos resultados a la modelación hidrogeológica de un sistema salar real, específicamente en el sector sur del Salar de Atacama, Región de Antofagasta, Chile. Para ello, se recopila la información pública disponible en la plataforma del Servicio de Evaluación Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, para posteriormente construir el modelo numérico en base a las recomendaciones de este trabajo.

Los resultados obtenidos se resumen como el comportamiento y la respuesta de la interfaz salina frente a la variación de parámetros que condicionan la dinámica de sistemas con flujo considerando densidad variable, teniendo diferentes impactos según la variable estudiada, como también la elaboración preliminar de un modelo hidrogeológico en tres dimensiones del sector sur del Salar de Atacama.

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

A mis padres, por todo el esfuerzo que han hecho, los valores que me han enseñado, y por sus oraciones constantes. Sin ustedes no habría sido posible.

A mi familia, por el cariño, por no perder la esperanza en mí, y por mis sobrinos, que siempre me lograr sacar una sonrisa.

A Hidromas, por darme esta oportunidad y por siempre creer en mí. Gracias por todo.

A los profesores parte de la comisión, muchas gracias por sus comentarios y su disponibilidad.

A mis amigos, por las palabras de aliento cuando más lo necesitaba.

A mi nueva familia-manada, por enseñarme lo que significa la paciencia y la compañía incondicional.

Finalmente, a Valeria, por haber llegado a mi vida en el momento que más lo necesita, por tu amor infinito, por ayudarme a crecer, por compartir este camino conmigo, y por tu apoyo incondicional. Gracias.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	Objetivos	2
1.3.	Metodología	3
2.	Antecedentes Generales	4
2.1.	Aspectos generales	4
2.2.	Estado del arte	4
2.3.	Caracterización conceptual de sistemas salares.....	6
2.4.	Definición de la interfaz salina	7
2.5.	Relación densidad-concentración en aguas presentes en salares	8
3.	Antecedentes relacionados a la modelación numérica de flujos con densidad variable	10
3.1.	Aspectos generales	10
3.2.	Ecuaciones de flujo y transporte en medios subterráneos con densidad variable.....	10
3.3.	Números característicos para modelación de flujos con densidad variable.....	12
3.4.	Relaciones numéricas para el análisis de la interfaz salina	16
3.5.	Códigos usados para modelar flujos con densidad variables.....	19
3.6.	Modelación hidrogeológica de salares – Casos reales.....	20
4.	Variables relacionadas a la construcción de modelos de flujos con densidad variable	26
4.1.	Aspectos generales	26
4.2.	Programa y código utilizado – SEAWAT.....	26
4.3.	Construcción modelo base I.....	29
4.4.	Análisis de las variables relacionadas a la construcción de modelos	36
5.	Análisis de sensibilidad y estudio de la interfaz salina	38
5.1.	Aspectos generales	38
5.2.	Construcción modelo base II.....	38
5.3.	Parámetros a evaluar.....	41
5.4.	Comportamiento y análisis de la interfaz salina frente a los distintos parámetros	42
5.5.	Extensión de resultados de modelo base II a modelo 3D.....	48
5.6.	Resultados del análisis de sensibilidad y estudio de la interfaz salina.....	58
6.	Aplicación de resultados al caso estudio: Sector Sur del Salar de Atacama	59
6.1.	Aspectos generales	59
6.2.	Metodología para la modelación del caso estudio	59
6.3.	Antecedentes del caso estudio	60
6.4.	Construcción del modelo numérico.....	71
6.5.	Resultados del caso estudio.....	76

7.	Conclusiones y recomendaciones	87
7.1.	<i>Conclusiones</i>	<i>87</i>
7.2.	<i>Recomendaciones para trabajos futuros.....</i>	<i>90</i>
8.	Bibliografía	91
Anexos	94
Anexo A.	Resultados de las variables relacionadas a la construcción de modelos de flujo con densidad variable.....	95
A.1.	<i>Efectos de la configuración de la grilla</i>	<i>95</i>
A.2.	<i>Efectos de las condiciones de borde.....</i>	<i>109</i>
Anexo B.	Resultados para los distintos parámetros usados para el análisis de sensibilidad y estudio de la interfaz salina	124
B.1.	<i>Permeabilidad.....</i>	<i>124</i>
B.2.	<i>Flujo en Borde Agua Dulce.....</i>	<i>128</i>
B.3.	<i>Dispersividad Longitudinal.....</i>	<i>132</i>
B.4.	<i>Dispersividad Vertical.....</i>	<i>136</i>
B.5.	<i>Dispersividad Longitudinal-Vertical.....</i>	<i>140</i>
B.6.	<i>Anisotropía Vertical</i>	<i>144</i>
B.7.	<i>Tasa de Evaporación.....</i>	<i>148</i>
B.8.	<i>Porosidad</i>	<i>152</i>
B.9.	<i>Carga Constante en Borde Salmuera.....</i>	<i>155</i>
B.10.	<i>SDT Borde Salmuera.....</i>	<i>159</i>
B.11.	<i>Variación de la densidad con respecto a la concentración</i>	<i>163</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Clasificación del agua según la cantidad total de sólidos disueltos	8
Tabla 3-1: Códigos usados para simular flujos con densidad variable	20
Tabla 3-2: Dimensiones de los modelos en experiencias anteriores	23
Tabla 3-3: Resumen de las principales características de las experiencias anteriores revisadas.....	24
Tabla 4-1: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT - Caso Base I	36
Tabla 4-2: Flujos netos a través de las condiciones de borde - Caso Base I	36
Tabla 4-3: Variables adimensionales de interés - Caso Base I.....	36
Tabla 5-1: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT - Caso Base II	40
Tabla 5-2: Flujos netos a través de las condiciones de borde - Caso Base II.....	41
Tabla 5-3: Variables adimensionales de interés - Caso Base II	41
Tabla 5-4: Estudio de la interfaz – Casos de estudio	41
Tabla 5-5: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión 3D - Caso Base II	49
Tabla 5-6: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión 3D - Caso Base II.....	50
Tabla 5-7: Variables adimensionales de interés – Extensión 3D - Caso Base II.....	50
Tabla 5-8: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión 3D - Permeabilidad	52
Tabla 5-9: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión 3D - Permeabilidad	52
Tabla 5-10: Variables adimensionales de interés – Extensión 3D - Permeabilidad.....	52
Tabla 5-11: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión 3D – Flujo Borde Agua Dulce.....	54
Tabla 5-12: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión 3D - Flujo Borde Agua Dulce	54
Tabla 5-13: Variables adimensionales de interés – Extensión 3D - Flujo Borde Agua Dulce.....	54
Tabla 5-14: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión 3D – Anisotropía Vertical	56
Tabla 5-15: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión 3D - Anisotropía Vertical.....	56
Tabla 5-16: Variables adimensionales de interés – Extensión 3D - Anisotropía Vertical	56
Tabla 6-1: Tasa de evaporación (mm/d) para cada zona.....	66
Tabla 6-2: Parámetros fisicoquímicos de las aguas en el sector de Callejón, Tilopozo y Salar.....	67
Tabla 6-3: Zonas y tasas de evaporación consideradas – Caso estudio	73
Tabla 6-4: Tipos de agua según su densidad y concentración de SDT	75
Tabla 6-5: Resultado calibración de los pozos de observación – Caso estudio	77
Tabla 6-6: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Caso estudio	80
Tabla 6-7: Variables adimensionales de interés – Caso estudio.....	81
Tabla 6-8: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Evaluación recarga en caso estudio.....	84
Tabla 6-9: Variables adimensionales de interés – Evaluación recarga en caso estudio	85
Tabla A-1: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Efecto espesor del modelo	95
Tabla A-2: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Efecto espesor del modelo	96
Tabla A-3: Variables adimensionales de interés - Efecto espesor del modelo.....	96
Tabla A-4: Casos de estudio - Efecto discretización horizontal.....	99
Tabla A-5: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT - Efecto discretización horizontal	99
Tabla A-6: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Efecto discretización horizontal.....	99
Tabla A-7: Variables adimensionales de interés - Efecto discretización horizontal	100
Tabla A-8: Casos de estudio - Efecto discretización vertical.....	102
Tabla A-9: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Efecto discretización vertical.....	102
Tabla A-10: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Efecto espesor del modelo	103

Tabla A-11: Variables adimensionales de interés - Efecto discretización vertical	103
Tabla A-12: Casos de estudio - Efecto refinamiento de grilla	106
Tabla A-13: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Efecto refinamiento de grilla	106
Tabla A-14: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Efecto espesor del modelo	106
Tabla A-15: Variables adimensionales de interés - Efecto refinamiento de grilla.....	107
Tabla A-16: Casos de estudio – Densidad mínima y máxima.....	109
Tabla A-17: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Densidad mínima y máxima.....	109
Tabla A-18: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Densidad mínima y máxima.....	110
Tabla A-19: Variables adimensionales de interés – Densidad mínima y máxima	110
Tabla A-20: Casos de estudio – Extensión fondo Borde Salmuera.....	112
Tabla A-21: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión fondo Borde Salmuera.....	112
Tabla A-22: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión fondo Borde Salmuera.....	112
Tabla A-23: Variables adimensionales de interés – Extensión fondo Borde Salmuera	113
Tabla A-24: Casos de estudio – Extensión Borde Agua Dulce.....	115
Tabla A-25: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión Borde Agua Dulce.....	115
Tabla A-26: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión Borde Agua Dulce.....	115
Tabla A-27: Variables adimensionales de interés – Extensión Borde Agua Dulce	116
Tabla A-28: Casos de estudio – Condición de flujo en Borde Agua Dulce	118
Tabla A-29: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Condición de flujo en Borde Agua Dulce.....	118
Tabla A-30: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Condición de flujo en Borde Agua Dulce	118
Tabla A-31: Variables adimensionales de interés – Condición de flujo en Borde Agua Dulce.....	119
Tabla A-32: Casos de estudio – Concentración mínima en transporte	121
Tabla A-33: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Concentración mínima en transporte.....	121
Tabla A-34: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Concentración mínima en transporte....	121
Tabla A-35: Variables adimensionales de interés – Concentración mínima en transporte	122
Tabla B-1: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz - Permeabilidad	124
Tabla B-2: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz - Permeabilidad....	124
Tabla B-3: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz - Permeabilidad.....	125
Tabla B-4: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Flujo Borde Agua Dulce	128
Tabla B-5: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Flujo Borde Agua Dulce	128
Tabla B-6: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Flujo Borde Agua Dulce	129
Tabla B-7: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal.....	132
Tabla B-8: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal	132
Tabla B-9: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal...	133
Tabla B-10: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Dispersividad Vertical.....	136
Tabla B-11: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Dispersividad Vertical.....	136
Tabla B-12: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Dispersividad Vertical	137
Tabla B-13: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal-Vertical	140

Tabla B-14: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal-Vertical	140
Tabla B-15: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal-Vertical	141
Tabla B-16: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Anisotropía Vertical	144
Tabla B-17: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Anisotropía Vertical	144
Tabla B-18: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Anisotropía Vertical.....	145
Tabla B-19: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Tasa de Evaporación	148
Tabla B-20: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Tasa de Evaporación	148
Tabla B-21: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Tasa de Evaporación.....	149
Tabla B-22: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Porosidad	152
Tabla B-23: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Porosidad.....	152
Tabla B-24: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Porosidad	152
Tabla B-25: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Carga Borde Salmuera.....	155
Tabla B-26: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Carga Borde Salmuera.....	155
Tabla B-27: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Carga Borde Salmuera.....	156
Tabla B-28: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – SDT Borde Salmuera.....	159
Tabla B-29: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – SDT Borde Salmuera	159
Tabla B-30: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – SDT Borde Salmuera.....	160
Tabla B-31: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Relación Densidad-SDT.....	163
Tabla B-32: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Relación Densidad-SDT	163
Tabla B-33: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Relación Densidad-SDT	164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Esquema del flujo subterráneo en las cercanías de un salar	6
Figura 2-2: Esquema de la interfaz salina en un acuífero costero idealizado	7
Figura 3-1: Resultados de Holzbecher (2005) al aumentar el valor del número de Rayleigh.....	14
Figura 3-2: Resultados de Holzbecher (2005) al aumentar el valor del parámetro Co	15
Figura 3-3: Resultados de Simpson & Clement (2004) al disminuir el valor del parámetro a	16
Figura 3-4: Esquema de las variables de interés para análisis de resultados.....	18
Figura 3-5: Esquema de las variables para el cálculo de la pendiente de la interfaz salina	19
Figura 4-1: Esquema del concepto de agua dulce equivalente.....	27
Figura 4-2: Esquema general de flujo del código SEAWAT	29
Figura 4-3: Esquema del modelo conceptual de referencia.....	30
Figura 4-4: Esquema del modelo base I.....	32
Figura 4-5: Distribución niveles piezométricos (m) - Caso Base I - Sin considerar densidad variable	33
Figura 4-6: Distribución de los vectores de velocidad (m/d) e isolíneas de concentración SDT (g/l) - Caso Base I – Sin considerar densidad variable.....	33
Figura 4-7: Distribución niveles piezométricos (m) - Caso Base I – Considerando densidad variable	34
Figura 4-8: Isolíneas de concentración SDT (g/l) - Caso Base I - Considerando densidad variable	34
Figura 4-9: Distribución de los vectores de velocidad (m/d) e isolíneas de concentración SDT (g/l) - Caso Base I - Considerando densidad variable	35
Figura 4-10: Concentración de SDT (g/l) en profundidad para cada pozo de observación – Caso Base I ..	35
Figura 5-1: Esquema conceptual del modelo base II	38
Figura 5-2: Distribución niveles piezométricos (m) - Caso Base II.....	39
Figura 5-3: Isolíneas de concentración SDT (g/l) - Caso Base II.....	39
Figura 5-4: Distribución de vectores de velocidad (m/d) e isolíneas de concentración SDT (g/l) - Caso Base II	40
Figura 5-5: Concentración de SDT (g/l) en profundidad para cada pozo de observación – Caso Base II ..	40
Figura 5-6: Relación entre los parámetros - ms y Co	43
Figura 5-7: Relación entre los parámetros - LDs y Co	43
Figura 5-8: Relación entre los parámetros - LDi y Co	44
Figura 5-9: Relación entre los parámetros - RD y Co	44
Figura 5-10: Relación entre los parámetros - RD y ms	45
Figura 5-11: Relación entre los parámetros - WD y Co	45
Figura 5-12: Relación entre los parámetros - WD y RD	46
Figura 5-13: Relación entre los parámetros - LDs y RD	46
Figura 5-14: Relación entre los parámetros - LDi y RD	47
Figura 5-15: Relación entre los parámetros - LDs y LDi	47
Figura 5-16: Geometría del modelo 3D	48
Figura 5-17: Isosuperficies de concentración SDT (g/l) – Modelo 3D.....	49
Figura 5-18: Concentración de SDT (g/l) en profundidad – Extensión 3D - Caso Base II.....	50
Figura 5-19: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión 3D - Caso Base II.....	51
Figura 5-20: Concentración de SDT (g/l) en profundidad – Extensión 3D - Permeabilidad	52
Figura 5-21: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión 3D - Permeabilidad	53
Figura 5-22: Concentración de SDT (g/l) en profundidad – Extensión 3D - Flujo Borde Agua Dulce	54
Figura 5-23: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión 3D - Flujo Borde Agua Dulce	55
Figura 5-24: Concentración de SDT (g/l) en profundidad – Extensión 3D - Anisotropía Vertical	56
Figura 5-25: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión 3D - Anisotropía Vertical	57
Figura 6-1: Ubicación de la zona de estudio	61
Figura 6-2: Caracterización geológica de la zona de estudio	63
Figura 6-3: Perfiles geológicos en la zona de estudio	64
Figura 6-4: Zonas de evaporación identificadas en el Salar de Atacama	65
Figura 6-5: Relación densidad-CE de las aguas en la zona de estudio	67
Figura 6-6: Relación densidad-SDT de las aguas en la zona de estudio	68

Figura 6-7: Ubicación interfaz salina en superficie y pozos de observación	68
Figura 6-8: Perfil hidrogeológico en la zona de estudio	70
Figura 6-9: Funcionamiento hidrogeológico de la zona de estudio	71
Figura 6-10: Dominio del modelo numérico y elevación de la zona de estudio	72
Figura 6-11: Condiciones de borde impuestas en el modelo – Caso estudio	74
Figura 6-12: Zonas de permeabilidad y pozos de observación considerados – Caso estudio	75
Figura 6-13: Gráfico de niveles calculados y observados – Caso estudio	76
Figura 6-14: Perfil longitudinal con niveles calculados – Caso estudio	77
Figura 6-15: Zonas según densidades y pozos de observación con datos de la interfaz – Caso estudio.....	78
Figura 6-16: Perfil en profundidad de la concentración de SDT en los pozos de observación – Caso estudio	79
Figura 6-17: Vectores de velocidad y superficie de isoconcentración – Caso estudio	80
Figura 6-18: Isoconcentraciones para el análisis de la interfaz salina – Caso estudio	81
Figura 6-19: Perfil longitudinal con niveles calculados - Evaluación de recarga en caso estudio.....	82
Figura 6-20: Zonas según densidad – Evaluación de la recarga en caso estudio	83
Figura 6-21: Perfil en profundidad de la concentración de SDT - Evaluación recarga en caso estudio	84
Figura 6-22: Relación entre los parámetros m_s y C_0 – Evaluación recarga en caso estudio	86
Figura A-1: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Efecto espesor del modelo	97
Figura A-2: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Efecto espesor del modelo	98
Figura A-3: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Efecto discretización horizontal.....	100
Figura A-4: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Efecto discretización horizontal.....	101
Figura A-5: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Efecto discretización vertical.....	104
Figura A-6: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Efecto discretización vertical	105
Figura A-7: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Efecto refinamiento de grilla	107
Figura A-8: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Efecto refinamiento grilla	108
Figura A-9: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Densidad mínima y máxima	110
Figura A-10: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Densidad mínima y máxima.....	111
Figura A-11: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Extensión fondo Borde Salmuera	113
Figura A-12: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión fondo Borde Salmuera.....	114
Figura A-13: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Extensión Borde Agua Dulce.....	116
Figura A-14: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión Borde Agua Dulce.....	117
Figura A-15: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Condición de flujo en Borde Agua Dulce	119
Figura A-16: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Condición de flujo en Borde Agua Dulce	120
Figura A-17: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Concentración mínima en transporte	122
Figura A-18: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Concentración mínima en transporte.....	123
Figura B-1: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Permeabilidad	126
Figura B-2: Concentración de SDT (g/l) en profundidad – Estudio de la interfaz - Permeabilidad	126
Figura B-3: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz - Permeabilidad	127
Figura B-4: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Flujo Borde Agua Dulce	130
Figura B-5: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Flujo Borde Agua Dulce	130
Figura B-6: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz - Flujo Borde Agua Dulce	131
Figura B-7: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal.....	133
Figura B-8: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal	134
Figura B-9: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz - Dispersividad Longitudinal.....	135
Figura B-10: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Dispersividad Vertical.....	137
Figura B-11: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Dispersividad Vertical	138
Figura B-12: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – Dispersividad Vertical	139
Figura B-13: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal-Vertical	141

Figura B-14: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal-Vertical	142
Figura B-15: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz - Dispersividad Longitudinal-Vertical	143
Figura B-16: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Anisotropía Vertical	145
Figura B-17: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Anisotropía Vertical	146
Figura B-18: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – Anisotropía Vertical.....	147
Figura B-19: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Tasa de Evaporación	149
Figura B-20: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Tasa de Evaporación	150
Figura B-21: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – Tasa de Evaporación.....	151
Figura B-22: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Porosidad	153
Figura B-23: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Porosidad	153
Figura B-24: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – Porosidad.....	154
Figura B-25: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Carga Borde Salmuera	156
Figura B-26: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Carga Borde Salmuera	157
Figura B-27: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – Carga Borde Salmuera	158
Figura B-28: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - SDT Borde Salmuera	160
Figura B-29: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – SDT Borde Salmuera	161
Figura B-30: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – SDT Borde Salmuera	162
Figura B-31: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Relación Densidad-SDT	164
Figura B-32: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Relación Densidad-SDT	165
Figura B-33: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de y llegó la interfaz - Relación Densidad-SDT	166

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Dada la importancia de los recursos subterráneos para el ser humano (Zektser & Everett, 2004), entenderlos, y predecir su comportamiento, es fundamental para proyectar su uso en el tiempo y poder utilizarlos de manera sustentable y eficiente.

Para estudiar dichos sistemas se recurren a diferentes herramientas computacionales, donde si se considera que el medio poroso posee densidad constante y uniforme en el espacio (caso tradicional), no existe mayor complejidad en la modelación numérica, siendo ampliamente usado el código MODFLOW para resolver dichos problemas (Karatzas, 2017).

En cambio, y si se considera por ejemplo los salares (cuencas endorreicas con una alta tasa de evaporación), al tener una geoquímica y condiciones ambientales particulares (Herrera et al, 2015), distintos fenómenos físicos y químicos alteran la calidad de las aguas, en particular, la que se refiere a las concentraciones de solutos, lo cual afecta directamente la densidad. Esto ocasiona una distribución espacial de dicha variable, condicionando el flujo subterráneo y dificultando su representación de manera sustancial dada la dinámica particular de dichos sistemas (Simmons et al., 2010).

Además, y debido a las altas concentraciones de soluto que puede alcanzar el agua teniendo como consecuencia una gran densidad (Vásquez et al, 2013), se genera un flujo subterráneo dependiente de dicha variable (Ackerer, Younes, & Mose, 1998; Simmons, 2004), lo cual trae consigo un sistema que es complejo de representar dadas las ecuaciones que representan el fenómeno, requiriendo información adicional debido a la importancia de la relación entre la densidad y la concentración.

Dentro de los esfuerzos por tratar de representar dichos flujos en medio poroso con densidad variable, se puede mencionar la construcción y adaptación de diversos códigos y modelos numéricos. Como ejemplo, existe el código SEAWAT (Guo & Bennett, 1998; Guo & Langevin, 2002; Langevin et al., 2008), que considera un enfoque en diferencias finitas con los cuales se resuelven las ecuaciones que caracterizan el flujo y transporte del soluto en medio poroso con densidad variable.

Cada uno de los modelos tiene sus ventajas y desventajas, además de diversos supuestos que simplifican el problema (Luszczynski, 1961; Konikow, Sanford, & Campbell, 1997; Post, Kooi, & Simmons, 2007). Algunas de las suposiciones corresponden el considerar una conductividad de agua fresca equivalente, o la transformación de los niveles de agua normalizando según alguna densidad de referencia, con lo cual se describe el sistema subterráneo con densidad variable de manera aproximada.

El problema de considerar ciertos supuestos, es que en algunos sistemas y condiciones particulares dejan de ser válidos incurriendo en errores (Ackerer, Younes, & Mose, 1998; Boufadel, Suidan, & Venosa, 1999; Woods, 2004; Simpson & Clement, 2004), además de la dispersión numérica propia de los modelos. Por ejemplo, y al tener sistemas con una dinámica tal que se genera una variabilidad de la densidad importante, se pueden generar flujos verticales, como también una interfaz estable entre dos zonas con diferencias de densidades importantes, ocasionando afloramientos. O también, supuestos sobre la relación densidad-concentración, donde los códigos usualmente consideran una dependencia lineal entre dichas variables, los cuales dejan de ser válidos cuando las concentraciones de soluto en el agua son elevadas, por lo que los procesos químicos juegan un rol importante siendo muy complejos de representar.

Dichas particularidades son algunos de los desafíos actuales y futuros al considerar flujo con densidad variable en medio poroso (Simmons, Fenstemaker, & Sharp Jr, 2001; Diersch & Kolditz, 2002; Simmons, 2004; Simmons et al., 2010), donde, y a pesar de que los modelos convergen y entregan resultados que se consideran correctos sobre el comportamiento del sistema subterráneo, queda en tela de juicio si son válidos, y si representan de manera adecuada todos los fenómenos involucrados.

Ahora, y al considerar los salares en el Norte Grande de Chile, se tiene que un factor importante corresponde a las altas concentraciones que alcanzan dichas aguas producto de la evaporación, superando con creces al agua de mar. Por lo cual, y al tratar de representar el flujo y el transporte en dichos sistemas subterráneos, es fundamental considerar la variabilidad espacial de la densidad en el medio poroso. Además, y según la Guía Para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas (Servicios de Evaluación Ambiental [SEA], 2010), “en términos generales, la modelación de acuíferos con cambios muy bruscos de densidad, como ocurre en salares del norte de Chile, es compleja, y los softwares pueden presentar problemas de estabilidad numérica y convergencia”.

Por ello, y dada la importancia de los salares desde el punto de vista económico (SERNAGEOMIN, 2014), como también ambiental (en dichos sistemas, se albergan ecosistemas únicos, siendo muy sensibles a los cambios en niveles de agua) (Garcés, 2016), es preponderante escoger la mejor herramienta para resolver el flujo con densidad variable en medio poroso característico de estos sistemas. Destaca la importancia de elaborar metodologías para la modelación hidrogeológica de salares al utilizar códigos recomendados por la autoridad, determinando los alcances y limitaciones en el proceso de modelación. También es relevante conocer a priori el comportamiento de estos sistemas frente a cambios en las distintas variables que condicionan el flujo y la interfaz salina, con el fin de ayudar en la construcción de modelos que representen el fenómeno, como también apoyar en la toma de decisiones estratégicas que pudieran afectar variables ambientales que dependen del equilibrio en estos sistemas.

1.2. Objetivos

El objetivo general corresponde a estudiar y analizar el comportamiento de la interfaz salina frente a los distintos parámetros hidrogeológicos considerando modelación de flujo en medio poroso con densidad variable, teniendo como caso estudio el Salar de Atacama, definiendo alcances y las limitaciones en el proceso de modelación.

Dentro de los objetivos específicos, se pueden mencionar:

- Revisar el estado del arte sobre la modelación de flujos de densidad variable en medios porosos.
- Caracterizar los sistemas subterráneos que presentan variabilidad considerable en la densidad (salar).
- Realizar análisis de las variables relacionadas a la construcción de modelos numéricos de flujos en medio poroso con densidad variable, especialmente cuando existe una gran diferencia en ésta.
- Determinar los parámetros hidrogeológicos que controlan la dinámica del sistema, realizando un estudio del análisis y comportamiento de la interfaz salina.
- Elaborar un modelo hidrogeológico de un salar, aplicada al caso estudio: Acuífero del Salar de Atacama.

1.3. Metodología

Se realizará una revisión bibliográfica del estado del arte sobre la modelación de flujos de densidad variable en aguas subterráneas, enfocándose en los supuestos considerados como también las técnicas para representar el flujo.

Se caracterizarán conceptualmente la dinámica de los sistemas subterráneos con densidad variable, en particular aquellos que tienen una diferencia considerable en este parámetro.

Se revisará la relación entre la densidad del agua y la concentración de soluto, siendo uno de los supuestos en los modelos de flujo en medio poroso de densidad variable al asumir una dependencia lineal, además de los fenómenos adicionales que pudieran existir, como lo sería la precipitación en el caso de existir altas concentraciones de sales.

Se revisarán antecedentes relacionados a experiencias anteriores en la modelación hidrogeológica de sistemas de salares, asociados a casos reales tanto en Chile como en el extranjero, considerando el nivel de información, parámetros y supuestos para su construcción.

Se construirán modelos numéricos para representar flujo con densidad variable utilizando el código SEAWAT.

Se definirá un modelo base I con el cual se harán los análisis del efecto de las distintas variables relacionadas a la construcción del modelo, como lo serían la configuración de la grilla y las condiciones de borde, siendo el modelo conceptual uno que represente un sistema típico de salares.

Se estudiará el comportamiento de la interfaz salina frente a las distintas propiedades hidrogeológicas del sistema que pudieran afectarla, como lo serían la concentración del soluto, la densidad del agua, la conductividad hidráulica, o la anisotropía de ésta última. Para ello, se definirá un modelo base II con el cual se realizarán los análisis.

Se recopilará y condensará la información recabada, aplicando los resultados a la modelación del caso de estudio Sector Sur del Salar de Atacama, en donde se construirá un modelo numérico basado en las condiciones observadas en la zona de estudio.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. Aspectos generales

La modelización de flujos en medios poroso con densidad variable sigue siendo un tema en desarrollo debido a lo complejo que resulta acoplar el efecto de la densidad al resolver de manera acoplada las ecuaciones de flujo y transporte, además de los procesos geoquímicos que condicionan y alteran el sistema.

Los esfuerzos por tratar de resolver el problema van desde transformar las ecuaciones gobernantes por aproximaciones de agua dulce equivalente, como también por considerar los procesos geoquímicos involucrados. En la siguiente sección se realizará una breve revisión del estado del arte con respecto a este tema.

Posteriormente, se describirá de manera conceptual el funcionamiento hidrogeológico de los salares, siendo el sistema de referencia para este trabajo. También se describirá la relación entre la densidad y la concentración de soluto en salares, correspondiente a una ecuación de estado del sistema y sobre la cual se realizan supuestos para su modelación.

2.2. Estado del arte

Uno de los trabajos de especial interés corresponde a la exhaustiva revisión del estado del arte en la modelación de flujo con densidad variable y transporte en medios porosos realizada por Diersch y Kolditz (2002), donde se estudian: (1) los modelos conceptuales de sistemas convectivos; (2) las ecuaciones gobernantes, las cuales están fuertemente acopladas y son altamente no lineales debido a la dependencia del comportamiento del material con la concentración de solutos y la temperatura; (3) leyes fenomenológicas; (4) relaciones constitutivas de la densidad del fluido y la viscosidad; (5) los métodos numéricos para resolver el problema. Además, se discute sobre las estrategias numéricas para abordar este problema acoplado, junto con las aproximaciones utilizadas y los errores basados en las grillas usadas.

Por otro lado, se discute sobre las debilidades e inconsistencias de los problemas de referencia para realizar las verificaciones de los modelos numéricos, siendo un proceso importante debido a la no linealidad de las ecuaciones y en donde las soluciones analíticas se encuentran limitadas solamente a casos simplificados. Junto con eso, se tiene evidencia de soluciones estacionarias no únicas, además de generarse perturbaciones significativas debido al refinamiento y no estructuramiento de las grillas.

Además, se propone como desafío el de representar áreas de heterogeneidad, teniendo un rol importante en la atenuación o amplificación de las perturbaciones. También es inherente la necesidad de simular densidad variable en problemas de gran escala, lo cual va de la mano con el desarrollo tecnológico, siendo necesario mejorar las estrategias para resolver estos problemas sobre todo en aplicaciones en tres dimensiones.

En el caso de la intrusión salina en acuíferos costeros, Werner et al. (2012) realizan una recopilación de los avances del conocimiento en intrusión salina, en los métodos para evaluarla y manejarla, y los futuros desafíos en el campo. En el último aspecto, destaca la brecha que existe en la caracterización y predicción de la interfaz salina en sistemas de escala regional, como también en la configuración de sistemas altamente heterogéneas y dinámicos.

Dentro de los esfuerzos por mejorar la importancia de los problemas de referencia, éstos se concentran principalmente en el problema de Henry (1964), donde los trabajos van desde aumentar la importancia del contraste de densidad (Simpson & Clement, 2003), hasta el de considerar

reacciones químicas en la zona de mezcla (Nick et al., 2012), llegando a nuevas soluciones semianalíticas para mejorar la representación del problema (Fahs et al., 2016).

Con respecto a la heterogeneidad, en el trabajo de Musuza et al. (2011) se hace una revisión con respecto a los trabajos relacionados a heterogeneidad y se evalúa la estabilidad de los flujos conducidos por densidad, definiendo predictores de estabilidad según parámetros relacionados a la dinámica del sistema. Por otro lado, Vásquez et al. (2013) incorporan reacciones químicas en las simulaciones de densidad variable alterando la estructura del acuífero en respuesta de los procesos geoquímicos variando la porosidad y la permeabilidad del sistema.

Adicional a lo anterior, en el caso de las reacciones químicas en estos sistemas destaca el trabajo de Hamann et al. (2015), en que acopla flujo de densidad variable con procesos hidrogeoquímicos en sistemas de salares, destacando la importancia de considerar dichas reacciones para entender y cuantificar las especies químicas presentes, la concentración de cada uno de los solutos disueltos y evaluar la evolución de las evaporitas. Caso contrario, y al no considerar las reacciones químicas, el modelo de transporte con densidad variable solo es útil para estudiar patrones de flujo, ya que se sobreestima la masa de las especies químicas y la extensión de la cuña salina. También es significativo el rol que cumplen las reacciones químicas en la posición y forma de la zona de mezcla, donde al disminuir la reactividad de los componentes químicos la posición de la zona de reacción se acerca hacia la zona de agua dulce (Nick et al., 2012).

En el caso de modelos regionales, en sistemas costeros el problema se aborda despreciando los efectos de la densidad variable y asumiendo algunas simplificaciones, tales como transformar a una presión equivalente de agua dulce la presión del agua de mar (Lu et al., 2015). Pero en el caso de sistemas de salares, los problemas de representar modelos regionales van desde que dichas simplificaciones no son del todo válidas debido a los procesos que condicionan el flujo (Holzbecher, 2005), además de no existir trabajos previos debido al alto gasto computacional que conlleva las dimensiones del problema, y de la ausencia de metodologías para considerar los efectos de la densidad variable en estos modelos. Dentro de los esfuerzos se tiene el trabajo de Marazuela et al. (2018), donde se propone una metodología para la modelación numérica 3D de estos sistemas basados en la corrección del agua dulce y del agua en la zona de mezcla con respecto a las variaciones de la densidad, permitiendo la reproducción de los flujos verticales que ocurren en la zona de mezcla usando bajos recursos computacionales.

Ahora, y al considerar el comportamiento de la interfaz salina, Abarca et al. (2006) estudió el efecto de la dispersividad tomando como referencia el problema de Henry, en donde: (1) el espesor de la zona de mezcla depende básicamente de la dispersión; (2) la penetración de la cuña salina que está controlada por la permeabilidad y por el promedio geométrico de las dispersividades (longitudinal y transversal); (3) el caudal de agua salada que ingresa al sistema está controlado por la dispersividad transversal y el promedio geométrico de la conductividad hidráulica. Lo último se corrobora en el trabajo de Strack et al. (2016), donde se demuestra que una reducción en la conductividad en la parte superior del acuífero costero reduce la intrusión de agua salina. Sin embargo, la mayor parte de los esfuerzos del estudio del comportamiento de la interfaz salina corresponden a sistemas costeros, siendo poco representativo para los salares y sistemas hipersalinos.

2.3. Caracterización conceptual de sistemas salares

Los salares corresponden a zonas ubicadas en cuencas endorreicas, en donde los flujos por precipitación, flujos superficiales y subterráneos son excedidos por la evaporación presente en el lugar, permaneciendo los niveles de aguas en las zonas de descarga muy cercanos al nivel topográfico (Hamann et al., 2015).

Por otro lado, debido al origen geológico y las reacciones físicas y químicas presentes en los salares, estos sistemas poseen una geoquímica particular conteniendo concentraciones importantes de diversas sales gatillado por la evaporación, incluso superando en algunos casos el punto de saturación.

Dentro de los procesos que alteran la química del agua, se encuentran (Yechieli & Wood, 2001):

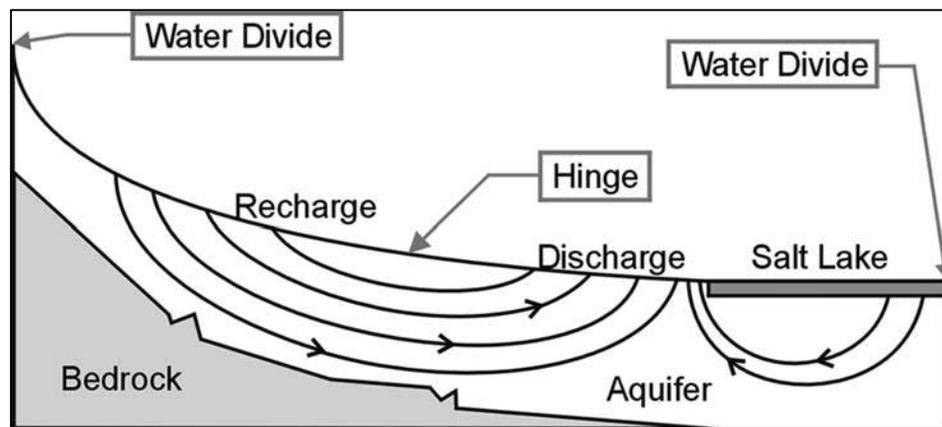
-Precipitación de sales: Corresponde a la mayor fuente de solutos en varios sistemas evaporativos, donde dependiendo del grado de saturación de diversas sales producto de la evaporación comienzan a precipitar cambiando la salmuera residual en el sistema.

-Procesos de disolución-precipitación: Debido a los flujos de agua, ésta interactúa con la roca circundante generando disolución y precipitación dependiendo del grado de saturación del mineral en cuestión. Uno de los procesos más comunes, y debido al contexto geológico de varios de estos sistemas, corresponde a la dolomitización, donde la calcita se disuelve y la dolomita precipita, pudiendo aumentar la concentración de calcio en la salmuera y la precipitación de sulfato de calcio.

-Reacciones Redox: Proceso relacionado con actividad biológica de comunidades adaptadas a las condiciones extremas de salinidad, los cuales son responsables de cambios químicos especialmente en la interfaz entre el agua dulce y salina. Uno de los procesos mejor documentados corresponde a la reducción de sulfato a sulfuro, donde existe reducción bacteriana de azufre. Reducción de otros iones como el nitrato tienen lugar en estos ambientes, produciendo amonio o gas N_2 .

Además de esto, y debido a altas concentraciones de solutos producto de la evapoconcentración, se genera un aumento considerable en la densidad de las aguas que condicionan la hidrodinámica del sistema. Como consecuencia del contraste de densidad entre las aguas precipitadas o de recarga y las aguas presentes en el salar, se tiene que los patrones de flujos están determinados por dos componentes (Holzbecher, 2005), un régimen boyante producto de un gradiente vertical de densidad en el salar, y un régimen regional producto del flujo de recarga tal como se muestra en la Figura 2-1.

Figura 2-1: Esquema del flujo subterráneo en las cercanías de un salar



Fuente: Holzbecher (2005).

Ahora, al existir una gran diferencia de las densidades entre las aguas de recarga y del salar, se genera una interfaz salina que fuerza al agua dulce de la recarga a ascender, aflorando y originando sistemas ambientales con condiciones únicas, los cuales se encuentran adaptados a dichas condiciones extremas y siendo muy sensibles a los cambios externos. Cabe destacar la importancia de la ubicación de la interfaz salina, puesto que da cuenta de dónde se generan los afloramientos y del potencial escurrimiento superficial que pudiera existir, generando disolución de la costra salina y por ende modificación de la geomorfología local, siendo un sistema dinámico.

2.4. Definición de la interfaz salina

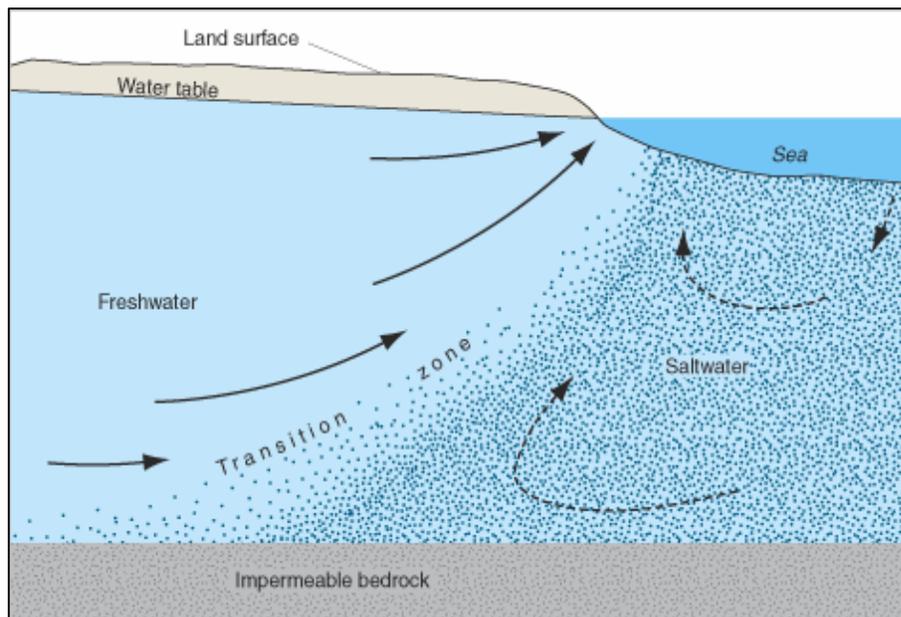
El contacto entre aguas con distintas densidades, en este caso dadas por el agua dulce y la salina, está caracterizado por una zona de mezcla, donde la concentración y la densidad varían a lo largo de dicha zona de mezcla debido a los procesos de dispersión hidrodinámica y difusión molecular, que conducen el agua salina dentro del agua dulce que sale, contribuyendo a la circulación convectiva dentro de la cuña salina (Werner et al, 2012).

Dicho contacto entre estos fluidos con características distintas, también se denomina interfaz salina, donde el fluido con menor densidad se superpone sobre el de mayor densidad, generando una cuña con cierta inclinación producto de la dirección y potencia del flujo de agua dulce.

En el caso de acuíferos costeros, la posición y características de la zona de mezcla son bien conocidas, donde la parte superficial coincide con la línea de costa (Werner et al, 2012). En cambio, en salares, donde el contraste de densidad es mayor que en acuíferos costeros, el desarrollo de la zona de mezcla es resultado del equilibrio entre la recarga de agua dulce y la evaporación, siendo mucho más difícil predecir la posición y geometría de la interfaz (Marazuela et al., 2018).

En la Figura 2-2 se muestra un esquema de la zona de mezcla o de transición para un acuífero costero, correspondiente a la zona intermedia entre el agua dulce y el agua salina.

Figura 2-2: Esquema de la interfaz salina en un acuífero costero idealizado



Fuente: Barlow (2003).

2.5. Relación densidad-concentración en aguas presentes en salares

Primero que todo, se tiene que al clasificar las aguas según la concentración de solutos un enfoque común corresponde en considerar la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), siendo una medición básica de la calidad de las aguas, y una variable que engloba la diversidad de solutos que pudieran existir, donde en la Tabla 2-1 se muestra la clasificación considerada por Fetter (2001).

Tabla 2-1: Clasificación del agua según la cantidad total de sólidos disueltos

Clasificación	SDT (mg/L)
Dulce	0 – 1,000
Salobre	1,000 – 10,000
Salina	10,000 – 100,000
Salmuera	> 100,000

Fuente: Fetter (2001).

Ahora, para representar la densidad del agua en medios subterráneos, se tiene que ésta es función de la presión, concentración de solutos y temperatura (Diersch & Kolditz, 2002), donde la dependencia es descrita mediante una aproximación lineal como sigue:

$$\rho = \rho_0(1 + \gamma(P - P_0) + \alpha(C - C_0) + \beta(T - T_0))$$

Donde ρ [M/L³] es la densidad, P [M/L/T²] es la presión del fluido, C [M/L³] es la concentración total de sólidos disueltos SDT, T [K] es la temperatura, γ [LT²/M] es la compresibilidad del fluido, y α [L³/M] y β [1/K] los coeficientes de expansión de los solutos y temperatura respectivamente, donde el subíndice 0 corresponde a los parámetros del fluido de referencia.

En caso de tener condiciones isotermales y despreciando el valor de la compresibilidad del agua, la ecuación de estado queda dada por:

$$\rho = \rho_0 + \alpha' C$$

Donde ρ_0 corresponde a la densidad del agua para $C_0 = 0$ y α' corresponde a $\alpha * \rho_0$, siendo la pendiente de la ecuación de estado. Por ejemplo, para problemas de intrusión salina del mar se utiliza un valor de $\alpha' \approx 0.71$ (Langevin et al., 2007).

Con respecto a la validez de la linealidad de la ecuación de estado, se tiene que la relación entre la densidad y concentración de STD, hasta aproximadamente 400 (g/l) de éste último, puede ser representada mediante una ecuación de estado lineal para los diferentes sistemas salares (Kohfahl et al., 2015), donde los rangos de la pendiente van entre los 0.64 y 0.75, siendo los valores menores para las salmueras dominadas por NaCl, mientras que valores altos aplica a salmueras alcalinas. Caso contrario, y al tener el sistema concentraciones mayores que la mencionada, la dependencia deja de ser lineal, debido en parte a los diversos procesos hidrogeoquímicos que comienzan a tener un rol importante.

Con esto, y para reducir la incertidumbre en modelos de densidad variable, es preponderante escoger un valor adecuado para la pendiente de la ecuación de estado, donde se entregan recomendaciones para construir adecuadamente la ecuación de estado (Kohfahl et al., 2015):

- En caso de no existir información suficiente para construir la ecuación de estado, se recomienda considerar una pendiente de 0.71, siendo un valor utilizado para agua de mar. Consecuentemente, realizar una sensibilidad al modelo para dicha variable, donde en caso de existir información de la química de la salmuera, la pendiente puede asumirse menor para sistemas dominados por NaCl, o mayor en casi de sistemas alcalinos.

- En caso de que no existan mediciones de la densidad, pero sí datos de concentración para los iones mayores, la ecuación de estado se puede determinar en base a la composición química de las muestras de agua. Cuando la composición química del agua de recarga es conocida, se puede evaluar el efecto de la evapoconcentración simulando evaporación con un código geoquímico como por ejemplo PHREEQC-3, aproximando la relación densidad-SDT.
- Finalmente, se debe tener precaución en modelos numéricos de transporte al limitar la concentración máxima y/o la densidad, debido a los efectos de la evapoconcentración. Un incremento ilimitado en la salinidad puede llevar a una sobreestimación de la densidad, la cual puede estar condicionada por el límite de saturación de halita en sistemas naturales.

3. ANTECEDENTES RELACIONADOS A LA MODELACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS CON DENSIDAD VARIABLE

3.1. Aspectos generales

Para representar los sistemas con densidad variable, las ecuaciones de flujo y transporte a resolver difieren con respecto al caso tradicional debido a que los supuestos sobre dicha componente dejan de ser válidos, puesto que la densidad está representada mediante una ecuación de estado que la relaciona con la presión, temperatura, y concentración de solutos, por lo que las ecuaciones de flujo y transporte se encuentran acopladas como se detallará más adelante. Además, se generan números adimensionales con el fin de describir y procesos que ocurren en estos sistemas y el comportamiento de la interfaz salina.

Dentro de los esfuerzos por tratar de representar estos sistemas, existen diversos códigos y programas donde los enfoques van desde transformar el problema a uno equivalente, o el de considerar distintos procedimientos y enfoques para resolver las ecuaciones. Además, se recopila información sobre experiencias anteriores en modelos de flujos con densidad variable, en particular aquellos sistemas hipersalinos.

3.2. Ecuaciones de flujo y transporte en medios subterráneos con densidad variable

Para la ecuación de flujo con densidad variable, y considerando la implementación de ésta en el código SEAWAT (Luo & Langevin, 2002), en base al principio de conservación de masa del fluido y del soluto se obtiene la siguiente expresión matemática al desarrollarla bajo algunos supuestos:

$$-\nabla \cdot (\rho \vec{q}) + \rho_s q_s = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t}$$

Donde ρ [M/L³] corresponde a la densidad del fluido, \vec{q} [L/T] corresponde a la descarga específica, ρ_s [M/L³] corresponde a la densidad del agua que entra en forma de fuente o sale en forma de sumidero, q_s [L/T] corresponde a la tasa de flujo volumétrico por unidad de volumen del acuífero representando fuente o sumidero, S_p [LT²/M] corresponde al almacenamiento específico en términos de la presión, P [M/L/T²] corresponde a la presión del fluido, θ [-] corresponde a la porosidad, y C [M/L³] corresponde a la concentración de soluto.

En el caso que la densidad del fluido sea constante, la variación de ésta con la concentración es nula, cancelándose los términos de la densidad en la ecuación anterior resultando un problema tradicional de flujo. Cabe destacar que, en la ecuación resultante en el caso de un sistema con densidad constante, se conservaría la masa del fluido y su volumen, pero en caso de sistemas con densidad variable solo se conservaría el volumen del fluido, incurriendo en diferencias importantes en la conservación de masa (Evans & Raffensperger, 1992). Es por ello que, para describir el flujo subterráneo en caso de existir diferencias de densidad importantes, se deben considerar flujos másicos en vez de flujos volumétricos.

Con respecto a la descarga específica, se tiene que en base a la ley de Darcy para un fluido con densidad variable, y considerando que las tres direcciones principales de la permeabilidad están alineadas con el sistema de coordenadas ortogonales $x - y - z$, la descarga específica está dada por:

$$q_x = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$q_y = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y}$$

$$q_z = -\frac{k_z}{\mu} \left[\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \right]$$

Cabe destacar que en la dirección vertical se refleja el efecto de la gravedad en el fluido, en donde la densidad debe ser calculada para cada tiempo y en cada punto para determinar la descarga específica. A pesar de ello, la distribución de la presión está controlada por la distribución de la densidad, por lo que las componentes horizontales de la descarga específica igual se ven afectadas por la variación de la densidad del sistema. De manera general, dicha variable queda escrita como:

$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu} (\nabla P + \rho \vec{g})$$

Con respecto a la ecuación de transporte de solutos, y considerando que la masa de soluto es transportada en el medio poroso por el flujo de agua subterránea (advección), difusión molecular, y dispersión hidrodinámica, ésta puede ser descrita como (Zheng & Bennet, 1995):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) - \nabla \cdot (\vec{v} C) - \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{i=1}^N R_i$$

Donde D [L^2/T] corresponde al coeficiente de dispersión hidrodinámica, \vec{v} [L/T] a la velocidad del fluido, C_s [M/L^3] corresponde a la concentración del agua que entra en forma de fuente o sale en forma de sumidero, y R_i [$M/L^3/T$] son las tasas de producción de soluto o decaimiento de éste debido a la reacción i dentro de las posibles N reacciones presentes.

Ahora, y dado que el flujo subterráneo causa una distribución de la concentración de solutos, y la redistribución de estos modifica la densidad del sistema y por ende afecta el movimiento del agua, es necesario resolver de manera conjunta las ecuaciones de flujo y transporte en el sistema debido a que se encuentran acoplados, siendo el motivo principal de la dificultad de simular flujo con densidad variable.

Para acoplar dichos fenómenos, y asumiendo condiciones isotermales y que el efecto de la presión de poro está incluido en el almacenamiento, la densidad está afectada principalmente por la concentración de soluto, donde la ecuación de estado para la primera está dada por (Luo & Langevin, 2002):

$$\rho = \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial C} C$$

Con esto, queda por determinar la relación entre la densidad y la concentración, donde en caso de agua de mar ésta se asume lineal teniendo un valor constante cercano a 0.71, mientras que en el caso que la concentración de soluto sea muy alta como sería en salares, puede que dicha ecuación no sea válida requiriendo alguna relación empírica entre la concentración y la densidad del fluido.

3.3. Números característicos para modelación de flujos con densidad variable

Para definir algunos parámetros y dimensiones del modelo, como también saber el comportamiento de ciertos procesos, se recurren a distintas relaciones con el fin de ayudar en la determinación de los valores de dichas variables y en el análisis de los resultados.

Algunas de esas relaciones, las cuales se van reiterando en diversos trabajos, corresponden a:

- **Número de Péclet (Hamann et al., 2015)**

$$Pe = \frac{||v|| * \Delta x}{D} \approx \frac{\Delta x}{\alpha_L} \leq 2$$

Donde $||v||$ [L/T] corresponde a la velocidad, Δx [L] corresponde a la discretización espacial horizontal, D [L²/T] es la dispersión hidrodinámica, y α_L [L] corresponde al coeficiente de dispersión longitudinal. La aproximación realizada corresponde a sistemas donde la difusión molecular no tiene un rol preponderante, quedando la difusión efectiva dominada por la dispersión hidrodinámica, simplificándose la velocidad en la ecuación.

Dicho criterio para el número de Péclet se utiliza para controlar las oscilaciones numéricas producto de una discretización espacial insuficiente con los métodos tradicionales (por ejemplo, Galerkin-FEM), las cuales aparecen en caso de que la parte advectiva en el transporte se vuelva dominante o cuando los gradientes son importantes (Diersch & Kolditz, 2002). Con esto, y considerando que la difusión efectiva está dominada por la dispersión hidrodinámica, se pueden evitar dichas oscilaciones numéricas ajustando el tamaño de la grilla, o considerando un valor adecuado para la dispersión.

- **Número de Rayleigh (Holzbecher, 2005)**

$$Ra = \frac{g * k * \Delta\rho * d}{\mu * D}$$

Donde k [L²] corresponde a la permeabilidad, $\Delta\rho$ [M/L³] corresponde a la diferencia de densidad, d [L] al espesor del modelo, siendo idéntico a la profundidad del acuífero, μ [M/L/T] a la viscosidad dinámica, y D [L²/T] a la difusión efectiva (difusión molecular y dispersión hidrodinámica).

El número de Rayleigh es un parámetro asociado a la convección salina que relaciona los términos boyantes y de gravedad con los esfuerzos provocados por difusión y dispersión, donde un valor crítico para el número de Rayleigh define la transición entre un transporte controlado por difusión-dispersión (valores bajos del número de Rayleigh) y un transporte convectivo debido a bulbos conducidos por densidad (valores altos del número de Rayleigh) (Holzbecher, 2005).

Dentro de los diversos estudios numéricos con respecto a los valores críticos para el número de Rayleigh, los principales resultados para sistemas netamente difusivos se pueden resumir como (Diersch & Kolditz, 2002): (1) para valores menores a $4\pi^2$ (~40) el transporte es solo por difusión y no convectivo, definiendo el límite como el primer número crítico de Rayleigh; (2) para números entre $4\pi^2$ (~40) y (240-300), en que se desarrolla un régimen convectivo con soluciones numéricas estables, definiéndose el límite superior como un segundo número crítico de Rayleigh; (3) mientras que para valores mayores a (240-300), se tiene un régimen convectivo con soluciones inestables y caracterizado por un comportamiento convectivo transiente y oscilatorio, generando inestabilidades en los bordes de las capas, las que se pueden interpretar como una creación y desaparición continua de celdas convectivas.

- **Número Co , Holzbecher E. (2005)**

$$Co = \frac{g * k * \Delta\rho}{\mu * v_{amb}}$$

Donde k [L^2] corresponde a la permeabilidad, $\Delta\rho$ [M/L^3] corresponde a la diferencia de densidad, μ [$M/L/T$] a la viscosidad dinámica, y v_{amb} [L/T] a la fuerza del flujo potencial hidráulico, pudiendo ser representada por un gradiente de presión, por la recarga, o la velocidad del flujo horizontal, el cual la mayoría de los casos es implementado en el modelo como una condición de borde.

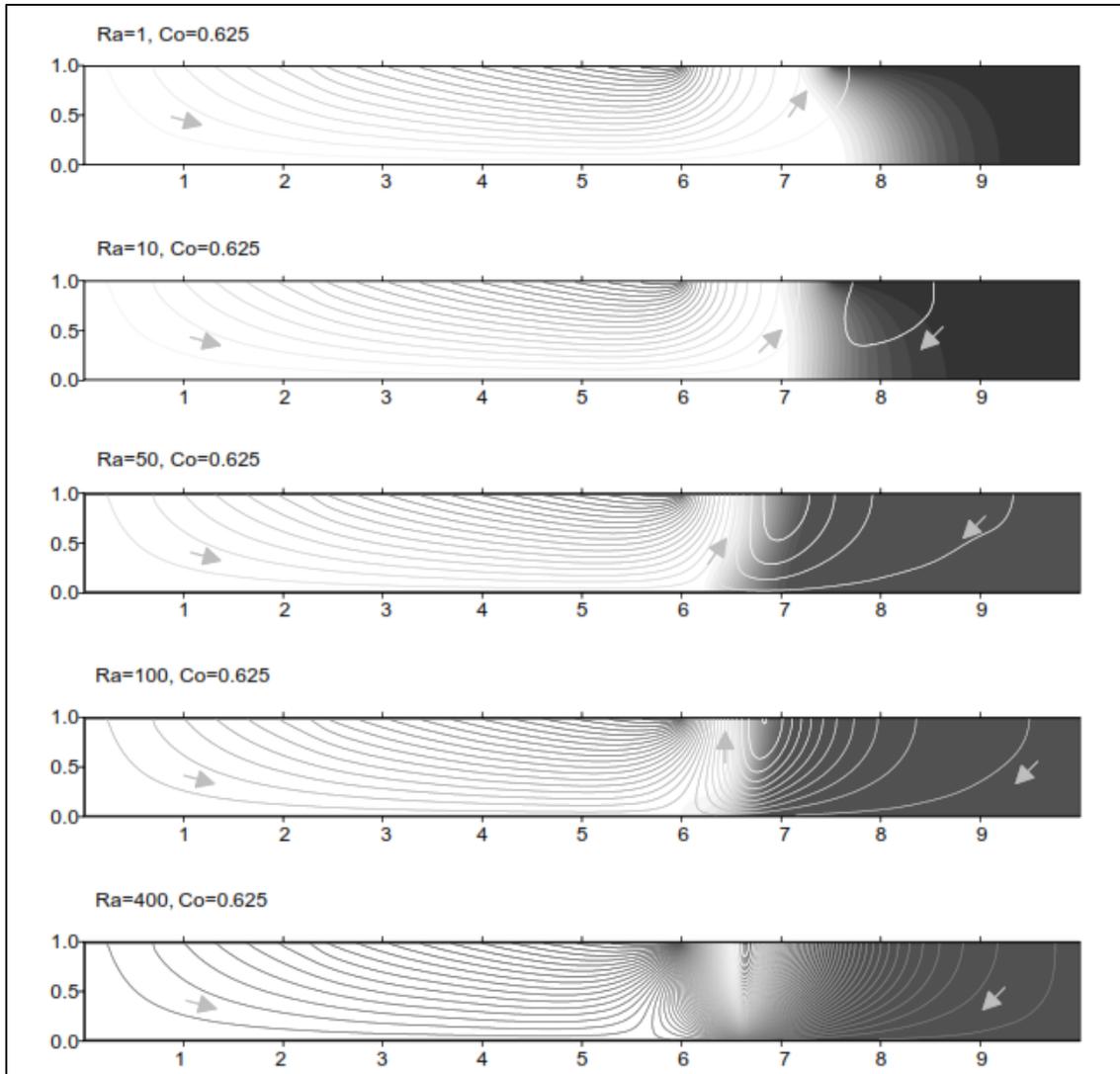
Dicho número cuantifica la relación entre las fuerzas del régimen convectivo producto del gradiente de densidad en comparación con el potencial hidráulico del sistema (recarga de agua) en la cuenca. En el trabajo de Holzbecher (2005) se muestra que la convección es principalmente determinada por el número de Rayleigh, mientras que los flujos regionales y el largo de la penetración de la cuña están caracterizados por el número Co , siendo un buen estimador de la fuerza de intrusión (Holzbecher, 1998).

En las Figura 3-1 y Figura 3-2 se presentan los resultados del trabajo de Holzbecher (2005), donde se muestran las líneas de flujo (mientras más cercanas se encuentren entre ellas implican una mayor velocidad), la salinidad (visualizadas en escala de colores, siendo mayor la concentración a medida que aumenta la intensidad del color), las direcciones principales de flujo, y los ejes adimensionales.

En el caso de Figura 3-1 se ve el efecto del número de Rayleigh, el cual tiene una influencia importante en la región debajo del salar (lado derecho), alterando las líneas de flujo y generando celdas convectivas, mientras que su influencia sobre el flujo regional es nulo (lado izquierdo), manteniendo la forma y distribución de las líneas de flujo.

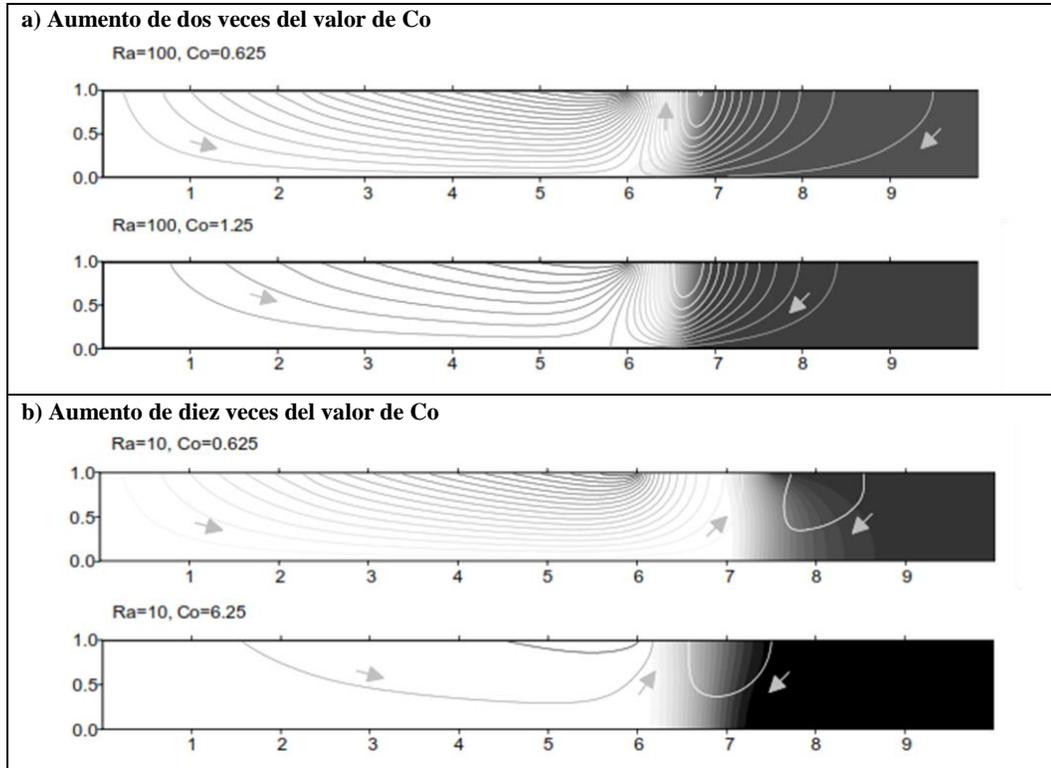
Con respecto a la Figura 3-2, en ésta se muestra el efecto de reducir el flujo regional lo cual a su vez modifica el valor para el parámetro Co , aumentándolo en un factor de 2 y de 10. Con esto, se aprecia una disminución en las líneas de flujo, y por ende de los flujos de agua y las velocidades, siendo mayor el efecto en el lado izquierdo correspondiente al flujo regional que en el lado derecho, correspondiente a los procesos convectivos.

Figura 3-1: Resultados de Holzbecher (2005) al aumentar el valor del número de Rayleigh



Fuente: Holzbecher (2005).

Figura 3-2: Resultados de Holzbecher (2005) al aumentar el valor del parámetro Co



Fuente: Holzbecher (2005).

- **Parámetro a de Henry (Simpson M.J., Clement T.P., 2004)**

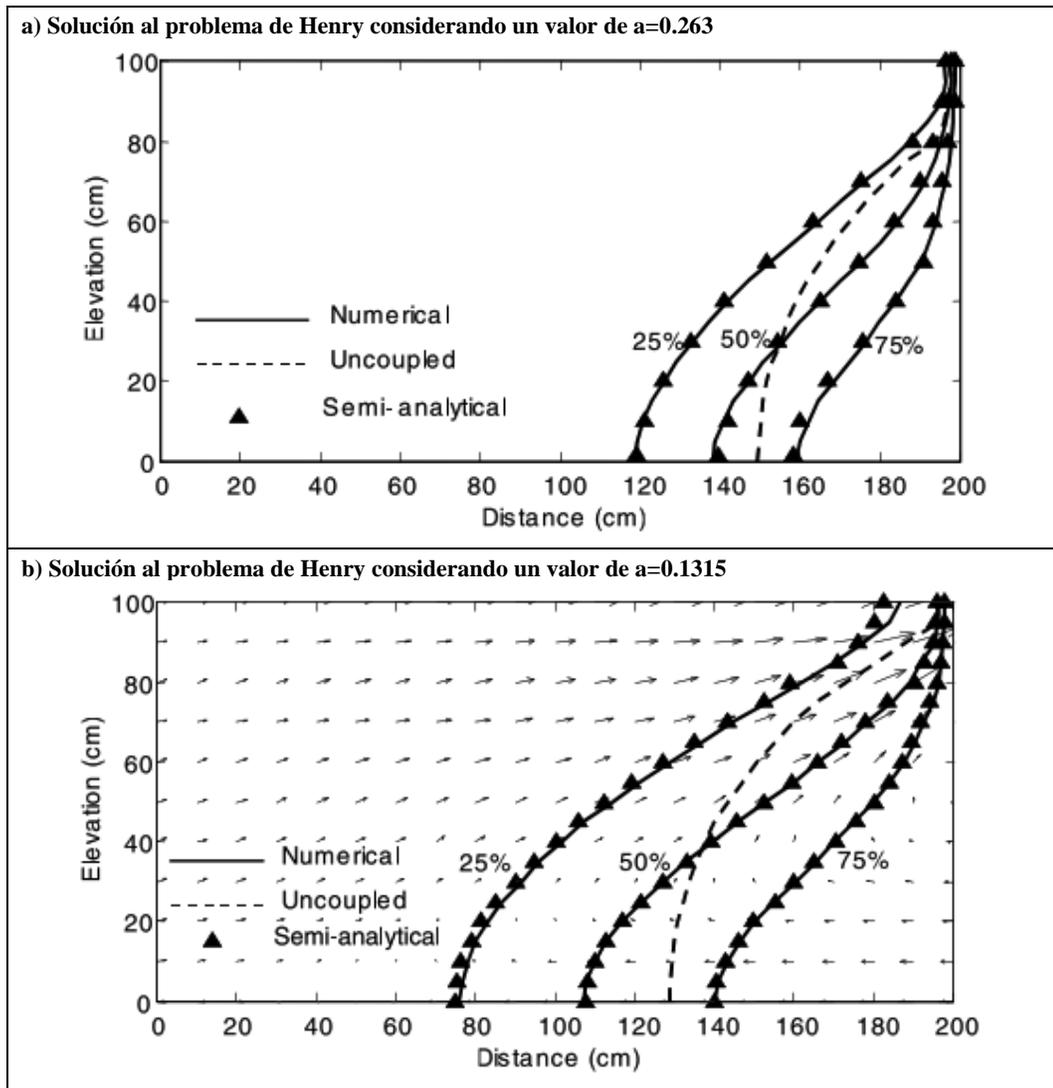
$$a = \frac{Q}{d * K * \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}}$$

Donde Q [L^2/T] corresponde a la recarga subterránea, d [L] corresponde al espesor del modelo, K [L/T] es igual a la conductividad hidráulica, ρ_s [M/L^3] corresponde a la densidad salina, mientras que ρ_0 [M/L^3] es igual a la densidad de agua dulce o de referencia.

En el caso del parámetro a , éste refleja el balance entre el flujo advectivo en el numerador versus el flujo conducido por diferencias de densidad en el denominador, donde para $a \sim 1$ significa que el flujo se encuentra balanceado, para $a \gg 1$ en el sistema predominan los procesos advectivos, mientras que para $a \ll 1$ dominan los procesos conducidos por densidad. Para el problema original de Henry se utilizó un valor de $a = 0.263$, donde para mejorar su relevancia como caso de prueba para los modelos de flujo subterráneo dependientes de densidad se redujo la recarga subterránea de agua dulce a la mitad obteniendo un valor de $a = 0.1315$ (Simpson & Clement, 2004).

En la Figura 3-3 se muestran los resultados correspondientes a las líneas de isoconcentraciones del trabajo de Simpson & Clement (2004), donde el borde izquierdo corresponde al acuífero de agua dulce, mientras que el costado derecho corresponde al borde costero. Al disminuir el flujo subterráneo entrante (y por ende, la disminución del parámetro a), se tiene que la zona de mezcla se encuentra desplazada hacia el lado del acuífero de agua dulce, además de existir una expansión de la zona de mezcla, teniendo la interfaz salina un mejor desarrollo y siendo más importante el contraste de densidad en la zona de interés que la recarga de agua dulce desde el borde izquierdo.

Figura 3-3: Resultados de Simpson & Clement (2004) al disminuir el valor del parámetro a



Fuente: Simpson & Clement (2004).

3.4. Relaciones numéricas para el análisis de la interfaz salina

Para analizar los resultados, se consideraron y modificaron ciertas variables de interés definidas en el trabajo de Abarca et al. (2006) para estudiar el comportamiento de la interfaz salina en el problema de Henry, las cuales han sido de referencia para algunos trabajos futuros en donde se evalúa y mide la interfaz salina (Nick et al., 2012; Fahs et al., 2016; Fahs et al., 2018).

Dentro de las variables, se considera de interés la penetración de la interfaz, el espesor de la zona de mezcla, la pendiente de la interfaz salina, y los flujos de agua salina, donde el último juega un rol importante en los procesos geoquímicos de la zona de mezcla (Rezaei et al., 2005).

Con respecto a las modificaciones de las variables de interés, éstas van enfocadas en representar la dinámica particular de los salares en comparación con los sistemas costeros, donde la salmuera cumple el rol de cuña permitiendo la elevación y afloramiento del agua dulce de recarga, por lo que las variables de interés quedan dadas por:

- Penetración adimensional de la interfaz salina superior e inferior:

$$L_{D_s} = \frac{L_{cuña_s}}{L} \quad ; \quad L_{D_i} = \frac{L_{cuña_i}}{L}$$

Donde $L_{cuña_s}$ [L] corresponde a la distancia horizontal máxima que alcanza la línea de isoconcentraciones de 25% medida desde el borde de agua dulce, $L_{cuña_i}$ [L] corresponde a la distancia horizontal mínima que alcanza la línea de isoconcentraciones de 75% medida desde el borde de agua dulce, mientras que L [L] corresponde al largo total del modelo como se muestra en la Figura 3-4. Esta variable tiene como finalidad evaluar el alcance de la recarga de agua dulce en el sistema, dada la conexión que existe entre ésta y los posibles afloramientos en la zona. Cabe destacar que considerar las isoconcentraciones de 25% y 75% tiene como finalidad que la zona de mezcla se encuentre contenida entre dichas dimensiones.

- Largo zona de mezcla:

$$L_{ZM} = L_{cuña_s} - L_{cuña_i}$$

Donde L_{ZM} [L] corresponde al largo considerado para la zona de mezcla como se muestra en la Figura 3-4, distancia horizontal sobre la cual se realizan las mediciones para estimar el espesor y pendiente de la interfaz salina.

En caso de que el valor de L_{ZM} sea elevado, implicaría una zona de mezcla extendida teniendo el flujo potencial de agua dulce un rol importante. Mientras que L_{ZM} al tener un valor bajo, la zona de mezcla tendría una inclinación mayor, siendo la cuña salina abrupta y teniendo la densidad un rol importante.

- Espesor adimensional de la zona de mezcla:

$$W_D = \frac{\overline{w_{0.8}} + \overline{w_{0.2}}}{2 * d}$$

Donde W_D [-] corresponde al espesor medio entre $\overline{w_{0.8}}$ y $\overline{w_{0.2}}$ [L], los cuales corresponden a las distancias verticales comprendidas entre las líneas de isoconcentraciones de 25% y 75% medidas a una distancia horizontal desde el largo de cuña $L_{cuña_i}$ de 0.8 y 0.2 veces L_{ZM} respectivamente, mientras que d [L] corresponde al espesor total del modelo, tal como se muestra en la Figura 3-4.

En caso de que el espesor W_D sea elevado, implicaría que la transición entre el agua dulce y salina abarca una mayor extensión, siendo importante los procesos de difusión y dispersión hidrodinámica. Mientras que, si el valor de W_D es bajo, implicaría una transición abrupta entre las aguas, por lo que los procesos de dispersión y difusión no tendrían un rol importante.

- Flujo salino adimensional:

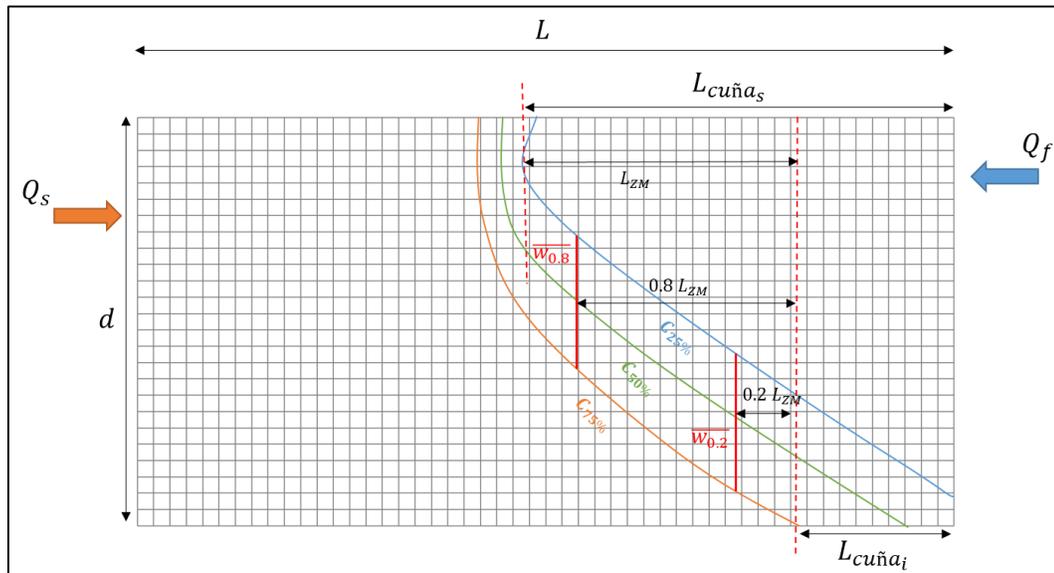
$$R_D = \frac{Q_s}{Q_f}$$

Donde Q_s [L²/T] corresponde al ingreso de agua por el borde salino del modelo, mientras que Q_f [L²/T] al ingreso de agua dulce tal como se muestra en la Figura 3-4, representando los flujos salinos advectivos y dispersivos que ingresan al dominio del modelo por el borde salino normalizados por el flujo de agua dulce.

En general, el valor del flujo salino es menor que el flujo de agua dulce debido a que en el primero predominan procesos convectivos, por lo que el valor de R_D es usualmente menor a 1. Dicho

parámetro cuantifica los flujos salinos, siendo importante en el control de los posibles procesos químicos en la zona de mezcla, por lo que un valor mayor de R_D implicaría una mayor actividad de dichos procesos.

Figura 3-4: Esquema de las variables de interés para análisis de resultados



Fuente: Elaboración propia.

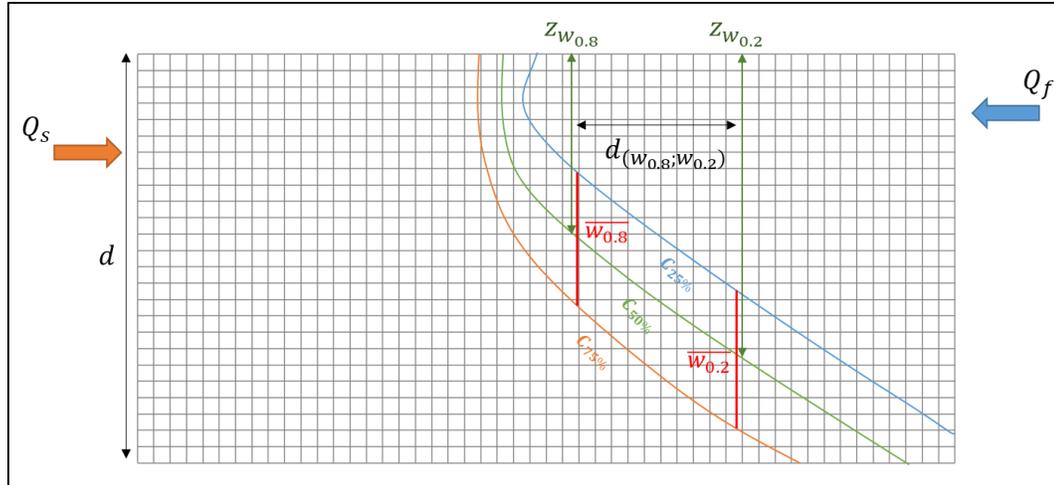
- Pendiente de la interfaz salina:

$$m_s = \frac{z_{w_{0.8}} - z_{w_{0.2}}}{d_{(w_{0.8};w_{0.2})}}$$

Donde $z_{w_{0.8}}$ y $z_{w_{0.2}}$ [L] corresponde a la ubicación vertical medida desde el fondo de la línea de isoconcentraciones de 50% desde donde se obtienen los espesores de $\overline{w_{0.8}}$ y $\overline{w_{0.2}}$ respectivamente, mientras que $d_{(w_{0.8};w_{0.2})}$ [L] corresponde a la distancia horizontal entre los puntos desde donde se obtienen los espesores de $\overline{w_{0.8}}$ y $\overline{w_{0.2}}$, tal como se muestra en la Figura 3-5.

Una mayor inclinación de la pendiente indicaría que la cuña salina se encuentra más erguida, por lo que el choque entre el agua dulce y salina es frontal, siendo el ascenso de la primera abrupto. En cambio, y al ser la inclinación menor, la cuña salina es más plana, por lo que existe un ascenso paulatino del agua dulce por sobre el agua salina, además de ser mayor la extensión de la superficie de contacto entre ambas aguas.

Figura 3-5: Esquema de las variables para el cálculo de la pendiente de la interfaz salina



Fuente: Elaboración propia.

3.5. Códigos usados para modelar flujos con densidad variables

Dentro de los programas y códigos para modelar flujos con densidad variable, primero se tiene que la mayoría de ellos resuelven de manera acoplada el sistema de ecuaciones tanto para flujo como para el transporte, siendo numéricamente complicado y computacionalmente demandante (Werner et al., 2012). La principal dificultad recae en obtener una solución precisa para la parte del transporte, la cual requiere una discretización muy fina pero que puede llevar a dispersión numérica no deseada.

Por otro lado, se tiene que la mayoría de los programas para modelar flujo con densidad variable han sido desarrollados para modelar acuíferos costeros y la intrusión salina del mar, donde en caso de sistemas con cambios bruscos de la densidad la modelación es compleja y dichos programas pueden presentar problemas de estabilidad numérica y dispersión (SEA, 2012).

Algunos de los códigos usados para flujos con densidad variable se describen en la Tabla 3-1, donde se mencionan sus características básicas. Dentro de los más usados y mejor documentados para simulación de interfaz salina destacan SEAWAT y SUTRA (Wheater, 2010), donde el primero usa el código MODFLOW para resolver el flujo y MT3D para resolver las ecuaciones de transporte, mientras que el segundo es un código de propósito general, aplicando un método híbrido de elementos finitos y diferencias finitas para resolver ambas ecuaciones asociadas al flujo y transporte (Werner et al., 2012).

Tabla 3-1: Códigos usados para simular flujos con densidad variable

Código	Esquema de solución	Grado de saturación	Referencia
2D/3DFEMFAT	FE	Saturado – No saturado	Cheng et al. (1998)
FEFLOW	FE	Saturado – No saturado	Diersch (2005)
FEMWATER	FE	Saturado – No saturado	Lin et al. (1997)
HYDROGEOSPHERE	FE	Saturado – No saturado	Therrien et al. (2004)
MOCDENSE	FD	Saturado	Sanford & Konikow (1985)
MODHMS	FD	Saturado – No saturado	HydroGeoLogic Inc. (2003)
PHT3D	FD	Saturado	Post & Prommer (2007)
SEAWAT	FD	Saturado	Langevin & Guo (2006)
SUTRA	FE/FD	Saturado – No saturado	Voss & Provost (2003)
SWI	FD	Saturado	Bakker et al. (2013)

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Modelación hidrogeológica de salares – Casos reales

Con respecto a los casos revisados, es de interés en cada uno de ellos las plataformas y códigos utilizados como también el proceso de construcción del modelo numérico de densidad variable, abarcando desde la configuración de la geometría hasta las condiciones de borde e iniciales, información que será de referencia para la definición del modelo base con el cual se realizarán los análisis.

Una breve descripción de los trabajos revisados que presentan modelos en densidad variable en dos dimensiones se muestra a continuación, mientras que en las Tabla 3-2 y Tabla 3-3 se muestran las dimensiones de los modelos construidos y algunos valores para los elementos de interés, respectivamente.

- Golder, 2018. Modelo de Densidad Variable Sector Tilopozo. Anexo 3 EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida Ltda.

Se construyó un modelo de flujo de densidad variable en dos dimensiones con el código de simulación SEAWAT (Langevin et al., 2008) por medio de la interfaz de usuario Groundwater Vistas, con el fin de analizar la posición de la interfaz salina en el sector de Tilopozo, ubicado en el Sector Sur del Salar de Atacama, II Región de Antofagasta, Chile. Además, se evaluó su evolución temporal y los cambios piezométricos en la zona, como respuesta a las extracciones de salmuera existentes en el Salar de Atacama y las extracciones de agua dulce en el acuífero.

Se consideraron dos condiciones temporales, una en régimen permanente asociada a la condición natural, y otra transitoria para estimar variaciones en la posición de la interfaz salina en el tiempo debido a las extracciones.

Para obtener la condición inicial del régimen permanente se realizó una estimación pseudo-estacionaria, donde el modelo se simuló en régimen transitorio desde una condición inicial arbitraria por un periodo suficientemente largo hasta alcanzar un equilibrio del flujo y transporte.

- Marazuela M.A. et al., 2018, 3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile).

Se construyó un modelo numérico de flujo y transporte subterráneo en dos dimensiones de una sección transversal idealizada y representativa de la zona de mezcla en el Salar de Atacama, II Región de Antofagasta, Chile. El fin fue interpretar las diferentes morfologías de la zona de mezcla

resultante de la construcción de un mapa tridimensional con los datos de observación en terreno de distintos pozos, y evaluar los efectos de la heterogeneidad en la geometría de la zona de mezcla.

Se consideró el código FEFLOW (Diersch, 2014) para resolver las ecuaciones que describen el flujo y transporte en aguas subterráneas considerando densidad variable. Los acuíferos se modelaron como confinados (transmisividad constante), debido a que las variaciones en los niveles son pequeñas en comparación con el espesor del acuífero dado, generando bajos gradientes hidráulicos.

Para las simulaciones, se consideró una concentración homogénea en todo el dominio, el cual se simuló por cientos de años con el fin de obtener un estado cuasi estacionario.

- SGA, 2015. Estudio hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. Anexo 1 - Adenda 5 EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

Se desarrollaron tres modelos numéricos de densidad variable en dos dimensiones en el sector Sur (La Punta / La Brava y Peine) y sector Este (Quelana) del Salar de Atacama, II Región de Antofagasta, Chile, para analizar el comportamiento del sistema en la Zona Marginal. Resulta de especial interés el perfil de La Punta/La Brava debido a que corresponde al caso de estudio posterior.

Para ello, se utilizó el modelo SEAWAT (Langevin et al., 2008), permitiendo la realización de la modelación de flujo de densidad variable, característico del flujo subterráneo en el Salar de Atacama. En adelante, se considerará solo el perfil La Punta / La Brava en el sector Sur del Salar.

Se consideraron tres configuraciones temporales para la modelación: la primera corresponde a un periodo de pre-calibración, con duración de 219 años y teniendo como fin obtener una distribución inicial completa y relativamente estable de las concentraciones del soluto usadas en el siguiente periodo de modelación.; la segunda corresponde a un periodo de calibración, donde el modelo se calibra con los registros históricos; y finalmente, la tercera corresponde a un periodo de predicción, donde se evalúan distintos escenarios con y sin proyecto.

- Hamann E. et al, 2015. Numerical investigation of coupled density-driven flow and hydrogeochemical processes below playas.

Se construyeron modelos con el fin de identificar la importancia de considerar procesos geoquímicos en el flujo subterráneo en salares, dada la complejidad de los procesos que ocurren en dichos sistemas.

Se utilizó el código SEAWAT para los casos de transporte de solutos no reactivos, mientras que para los casos de considerar procesos reactivos se utilizó el modelo PHT3D (Prommer et al, 2003), el cual acopla el modelo de reacciones geoquímicas PHREEQC-2 (Parkhurst & Appelo, 199) con SEAWAT.

El periodo de simulación corresponde a 6,000 años, tiempo en el cual se alcanza el punto de saturación de halita, con una discretización temporal de 0.1 años para los primeros 1,000 años, mientras que de 1 año para el resto del tiempo de simulación.

- Vázquez C. et al., 2013, Modeling flow and reactive transport to explain mineral zoning in the Atacama salt flat aquifer, Chile.

Se construyó un modelo de densidad variable en dos dimensiones, en donde se estudió la importancia de incorporar procesos geoquímicos en modelar el acuífero del Salar de Atacama, II Región de Antofagasta, Chile, teniendo especial interés el impacto de precipitación/disolución en las propiedades físicas y patrones de flujos.

Se utilizó el código SHEMAT (Clauser, 2003), el cual resuelve las ecuaciones de flujo acopladas con transporte reactivo de iones y precipitación mineral, considerando densidad, viscosidad, porosidad y permeabilidad variable.

Las simulaciones se desarrollaron en régimen transiente con una duración tal que los cambios en la altura equivalente de agua dulce y densidad fueran menores al 0.1% entre dos pasos de tiempos consecutivos, requiriendo desde 1,000 años para los casos simples y de hasta 15,000 años para los casos complejos.

- Yager. R.M., Kappel W.M., Plummer L.N., 2007, Origin of halite brine in the Onondaga Trough near Syracuse, New York State, USA: modeling geochemistry and variable-density flow.

Se construyó modelo de flujo de densidad variable en dos dimensiones, con el fin de determinar el origen de la salmuera en el valle de Onondaga, Estado de Nueva York, EEUU.

Se utilizó el código SEAWAT para modelar el perfil, donde como configuraciones temporales se tiene un primer periodo de 2,000 años representando la disolución de halita desde el acuífero inferior y acumulación de salmuera en los sedimentos glaciares, y un segundo periodo de 15,000 años representando la dilución de salmuera producto del agua dulce.

- Tejeda I., Cienfuegos R., Muñoz J., Durán M., 2003. Numerical modeling of saline intrusion in Salar de Atacama.

Se construyó un modelo en dos dimensiones con el fin de representar la dinámica del acuífero en la zona marginal del Salar de Atacama, II región de Antofagasta, Chile.

Para resolver las ecuaciones de flujo y transporte, las derivadas temporales son remplazadas por una aproximación en diferencias finitas considerando un esquema tipo Crank-Nicholson, para los términos no lineales se considera el método de Picard, mientras que para la discretización espacial se considera un esquema de diferencias finitas, siendo el esquema upwind utilizado para los términos convectivos.

Tabla 3-2: Dimensiones de los modelos en experiencias anteriores

Documento	Extensión modelo (m)	Profundidad del modelo (m)	Discretización horizontal (m)	Discretización vertical (m)	Cantidad de columnas	Cantidad de capas	Cantidad de elementos
Golder, 2018	20,000	163	50	12.5 – 10 – 2	400	18	7,200
Marazuela et al., 2018	25,000	1,200	-	-	-	-	153,000
SGA, 2015	11,500	400	50	5	230	80	18,400
Hamann et al., 2015	100	10	1 – 0.1	1 – 0.062	-	-	1,117
Vásquez et al., 2013	4,000	112	14	14	286	8	2,288
Yager et al., 2007	37,000	200	38	3.8	1,000	50	50,000
Tejeda et al., 2003	28,000	650	248	28	113	23	2,599

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-3: Resumen de las principales características de las experiencias anteriores revisadas

Documento	Conductividad hidráulica Salar (m/d)	Porosidad (-)	Difusión (m²/d)
Golder, 2018	50 - 200	0.3	-
Marazuela et al., 2018	50	0.1	-
SGA, 2015	500 – 100	0.3	8.64e-6
Hamann et al., 2015	0.864	0.25	8.64e-5
Vásquez et al., 2013	8.5	0.1	0.057
Yager et al., 2007	72 - 8	0.3	-
Tejeda et al., 2003	8.5	0.04	5.70e-4
Documento	CB agua dulce	Valor de CB agua dulce	Concentración agua dulce (g/l)
Golder, 2018	Carga constante	2,340 (msnm)	0
Marazuela et al., 2018	Recarga superficial	0.04–1.15 (mm/d)	1,000*
SGA, 2015	Carga constante	2,306.1 (msnm)	6.5
Hamann et al., 2015	Recarga superficial	0.22 (mm/d)	-
Vásquez et al., 2013	Recarga subterránea	68.5 (mm/d)	-
Yager et al., 2007	Carga constante	-	-
Tejeda et al., 2003	Recarga subterránea	8.64 – 17.28 – 25.92 (mm/d)	0
Documento	Condición de recarga superficial	Tasa de recarga superficial (mm/d)	Condición de evaporación Salar
Golder, 2018	No	-	Sí
Marazuela et al., 2018	Sí	0.04 – 1.15	No
SGA, 2015	Sí	0.005	Sí
Hamann et al., 2015	Sí	0.22	Sí
Vásquez et al., 2013	No	-	Sí
Yager et al., 2007	-	-	-
Tejeda et al., 2003	-	-	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-3 (continuación): Resumen de las principales características de las experiencias anteriores revisadas

Documento	Almacenamiento (-)	Dispersión Longitudinal (m)	Dispersión Transversal (m)	Dispersión Vertical [m]
Golder, 2018	0.1 - 0.15	5	0.01	0.25
Marazuela et al., 2018	0.25	100	10	-
SGA, 2015	-	25	-	0.0025
Hamann et al., 2015	0	2	1	-
Vásquez et al., 2013	-	23.5	23.5	-
Yager et al., 2007	-	20	0.0015	-
Tejeda et al., 2003	-	35	12.5	-
Documento	CB salmuera	Valor de CB salmuera	Concentración salmuera (g/l)	Relación $\partial\rho/\partial C$
Golder, 2018	Carga constante	2,299.5 (msnm)	300	0.7
Marazuela et al., 2018	Carga constante	Cota superficie	1,230*	-
SGA, 2015	Carga constante	2,299.3 (msnm)	330	0.67
Hamann et al., 2015	Evaporación	0.19–0.25 (mm/d)	-	0.61 – 0.81
Vásquez et al., 2013	Evaporación	0.27–1.23 (mm/d)	-	-
Yager et al., 2007	Concentración constante	-	-	-
Tejeda et al., 2003	Evaporación	4.27 (mm/d)	-	-
Documento	Tasa de evaporación (mm/d)	Representación de lagunas	Valor de representación de lagunas	
Golder, 2018	0.15	Evaporación	6.15 (mm/d)	
Marazuela et al., 2018	-	No	-	
SGA, 2015	0.14	Condición dren	Cota superficie	
Hamann et al., 2015	0.19 – 0.25	No	-	
Vásquez et al., 2013	0.27 – 1.23	Carga constante	Cota superficie	
Yager et al., 2007	-	Condición dren	Cota superficie	
Tejeda et al., 2003	4.27	Carga constante	Cota superficie	

Fuente: Elaboración propia.

4. VARIABLES RELACIONADAS A LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE FLUJOS CON DENSIDAD VARIABLE

4.1. Aspectos generales

Para evaluar los efectos de las variables relacionadas a la construcción de modelos de flujos con densidad variable, primero se realizará una breve descripción del código SEAWAT y software utilizado, que en este caso corresponde a *Groundwater Modeling System (GMS)*, además se menciona el supuesto considerado para transformar el problema en uno equivalente junto con el esquema de solución para abordar el sistema de ecuaciones acoplados.

Con ello, posteriormente se definirá el modelo base con el cual se realizarán los análisis en la construcción del modelo teniendo como referencia las experiencias anteriores en lo que respecta a modelación de flujos con densidad variable. Dentro de los análisis, se evaluará el efecto de la construcción de la grilla como también de las condiciones de bordes impuestas.

4.2. Programa y código utilizado – SEAWAT

4.2.1. Descripción general

El código SEAWAT es una versión acoplada de MODFLOW (Harbaugh et al., 2000) y MT3DMS (Zheng & Wang, 1999; Zheng, 2006), el cual fue diseñado con el fin de simular flujo subterráneo con densidad variable en tres dimensiones y transporte de especies múltiples en medio poroso saturado. Para ello, SEAWAT sigue una estructura modular realizando leves modificaciones a los códigos fuentes, donde en el caso de MODFLOW en vez de conservar el volumen de fluido en la ecuación de continuidad se conserva la masa del fluido, además de considerar como variable dependiente principal la carga de agua dulce equivalente, donde el flujo celda por celda es producto de los gradientes de dicha variable y de las diferencias relativas de densidad. El campo de flujos resultantes es incorporado a MT3DMS para el transporte de solutos, donde se realiza una actualización de la distribución de densidad producto de nueva concentración de solutos, para finalmente ser reincorporados a MODFLOW como diferencias relativas de densidad (Guo & Langevin, 2002).

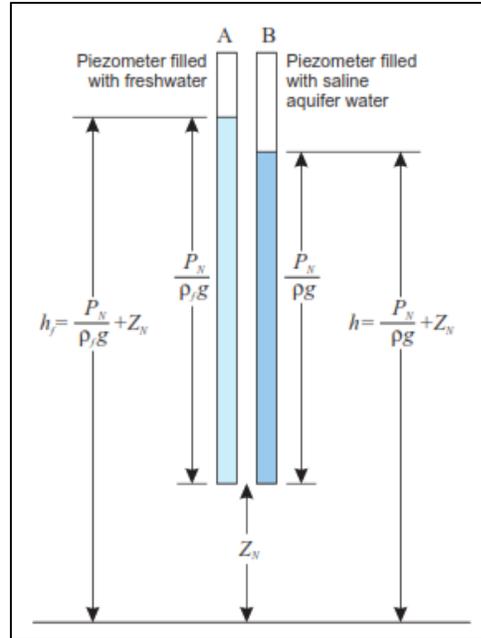
La última versión del código corresponde a SEAWAT_V4 (Langevin et al., 2008), donde el principal cambio con respecto a las versiones anteriores es el de considerar los efectos de la temperatura en el flujo de densidad variable, lo cual también lleva a cambios en la viscosidad del fluido. Por otro lado, la ecuación de estado de la densidad del fluido puede ser función de una o más especies definidas en el módulo de transporte MT3DMS, como también un término asociado a la presión.

Para la construcción de los modelos e implementación del código SEAWAT se utilizó el software comercial GMS (versión 10.2.6), siendo una interfaz gráfica desarrollada por AQUAVEO diseñada como un entorno comprensivo de modelación, debido a la facilidad de compartir información entre los distintos tipos de modelos y datos, como el de incorporar un ambiente especial para el desarrollo del modelo conceptual, facilitando la construcción y modelación de aguas subterráneas.

4.2.2. Concepto de altura de agua dulce equivalente

Para resolver las ecuaciones de flujo y transporte e interpretar los resultados, SEAWAT se basa en el concepto de altura equivalente de agua dulce, el cual considera dos piezómetros conectados que se encuentran en equilibrio pero sin posibilidad que exista mezcla entre ellos, teniendo uno agua salina representativa del sistema de densidad variable y el otro agua dulce siendo su equivalente, tal como muestra la Figura 4-1.

Figura 4-1: Esquema del concepto de agua dulce equivalente



Fuente: Guo & Langevin (2002).

Ahora, y considerando que en el punto N ambos piezómetros tienen la misma presión debido a que se encuentran en equilibrio, la carga hidráulica para cada uno de los piezómetros está definida por:

$$h = \frac{P_N}{\rho g} + Z_N$$

$$h_f = \frac{P_N}{\rho_f g} + Z_N$$

Donde h [L] corresponde a la altura del sistema, h_f [L] a la altura de agua dulce equivalente, P_N [MT²/T] corresponde a la presión en el punto N, ρ [M/L³] a la densidad del sistema salino, ρ_f [M/L³] a la densidad del agua dulce, y Z_N [L] corresponde a la elevación del punto N desde un datum de referencia.

Al igualar la presión en las expresiones anteriores, se tienen las siguientes relaciones entre las alturas de agua salina y su equivalente de agua dulce para las posteriores conversiones:

$$h_f = \frac{\rho}{\rho_f} h - \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} z$$

$$h = \frac{\rho_f}{\rho} h_f - \frac{\rho - \rho_f}{\rho} z$$

Por otro lado, y considerando la permeabilidad intrínseca del material k [L], la conductividad hidráulica referencial al agua dulce queda dada por:

$$K_f = \frac{k \rho_f g}{\mu_f}$$

Además, y escribiendo la presión en términos de la altura de agua dulce equivalente:

$$P = \rho_f g (h_f - z)$$

Con esto, la ley de Darcy para densidad variable considerando el concepto de agua dulce equivalente queda descrita como sigue:

$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu} (\nabla P + \rho g \nabla z) \rightarrow \vec{q} = -\frac{\mu_f}{\mu} K_f \left(\nabla h_f + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \nabla z \right)$$

Finalmente, dicha relación es reemplazada en la ecuación de flujo descrita anteriormente, con lo cual se tiene el sistema de ecuaciones equivalentes a resolver.

4.2.3. Discretización temporal

La discretización temporal implementada en SEAWAT, corresponde a una combinación de los esquemas usados por MODFLOW y MT3DMS.

Para las aplicaciones convencionales de MODFLOW, la simulación total es dividida en uno o más periodos de estrés, donde en cada uno de ellos las tasas de flujo y las condiciones de nivel permanecen constante. Cada periodo de estrés además es dividido en uno o más pasos de tiempo, con el fin de generar resultados más precisos y guardar los datos de aquellos tiempos de interés. MODFLOW resuelve las ecuaciones de flujo desde un paso de tiempo t_n a un tiempo t_{n+1} .

En el caso del transporte, y debido a que MT3DMS fue diseñado para trabajar en conjunto con MODFLOW, MT3DMS divide cada paso de tiempo usado por MODFLOW en pasos de transporte, siendo un aumento en la discretización temporal para resolver las ecuaciones de transporte y cumplir los requerimientos de estabilidad dado el esquema explícito de solución implementado en MT3DMS.

Dentro de los requerimientos de estabilidad y precisión en los resultados, Zheng & Wang (1999) mencionan las siguientes restricciones, las cuales son calculadas internamente por el programa:

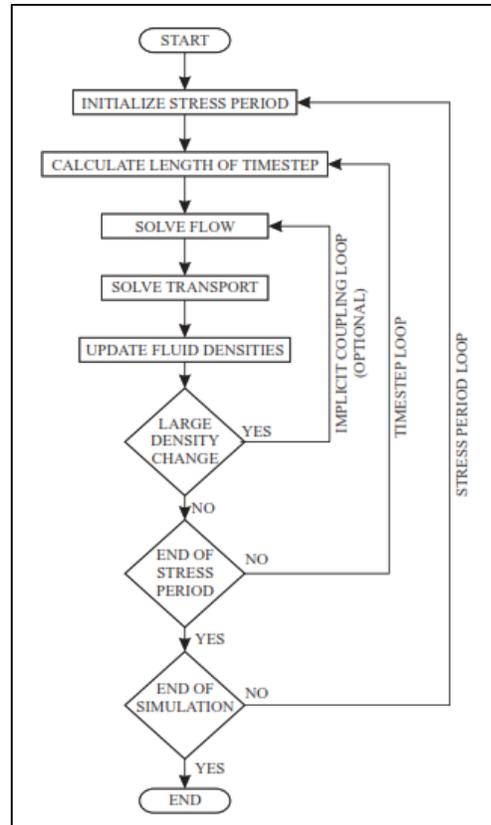
- **Advección:** $\Delta t \leq \frac{1}{\frac{v_x}{\Delta x} + \frac{v_y}{\Delta y} + \frac{v_z}{\Delta z}}$
- **Dispersión:** $\Delta t \leq \frac{0.5}{\frac{D_{xx}}{\Delta x^2} + \frac{D_{yy}}{\Delta y^2} + \frac{D_{zz}}{\Delta z^2}}$
- **Fuente/Sumideros:** $\Delta t \leq \frac{\theta}{|q_s|}$

Donde Δt [T] corresponde al largo del paso de tiempo de transporte, $\Delta x - \Delta y - \Delta z$ [L] corresponde a las dimensiones de las celdas del modelo.

4.2.4. Esquema de solución de las ecuaciones de flujo y transporte

Para resolver de manera conjunta las ecuaciones de flujo y transporte, se utiliza un enfoque sincronizado de los pasos de tiempo que recircula entre las soluciones de flujo mediante MODFLOW y de transporte mediante MT3DMS. En la Figura 4-2 se muestra un esquema general del procedimiento realizado por SEAWAT para resolver de manera conjunta las ecuaciones de flujo y transporte.

Figura 4-2: Esquema general de flujo del código SEAWAT



Fuente: Guo & Langevin (2002).

4.3. Construcción modelo base I

4.3.1. Descripción modelo base I

Para definir el modelo base I de estudio, y según los trabajos revisados anteriormente, se consideró la conceptualización de la dinámica de estos sistemas como también valores para los distintos fenómenos físicos que ocurren en él, en particular, aquellos del sector del Salar de Atacama.

Además, se realizaron diversas pruebas con distintas configuraciones para determinar los parámetros adecuados que simulen una situación referencial con la cual se realizará los posteriores análisis, siendo una representación simplificada de la dinámica de estos sistemas.

Para el modelo de transporte, se consideró como soluto la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), siendo la variable que se relaciona de manera lineal con la densidad del agua en el sistema.

- Modelo conceptual

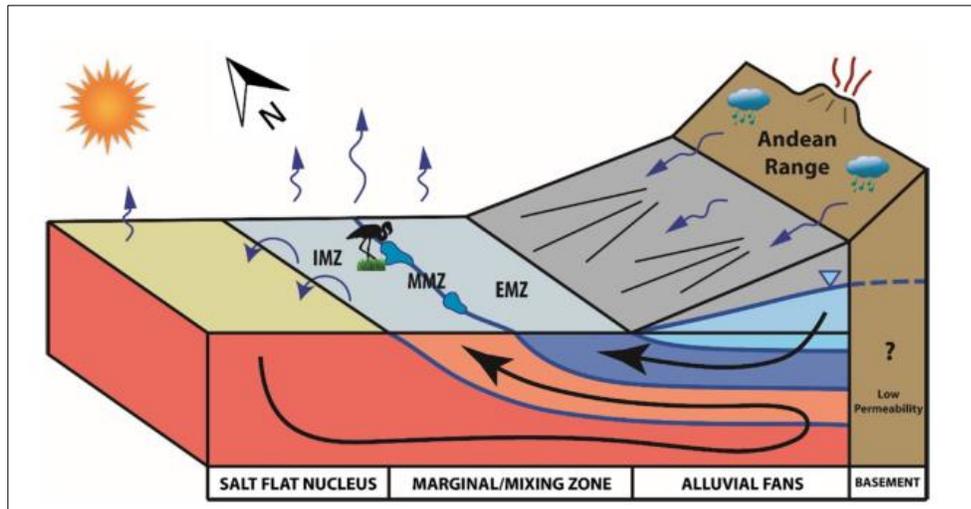
Se considera como referencia el trabajo realizado por Marazuela et al. (2018), siendo similar a otros trabajos como los de Tejeda et al. (2003) y Vásquez et al. (2013), donde conceptualmente en el sistema existe una recarga de agua dulce, en este caso desde la Cordillera de los Andes producto de las precipitaciones esporádicas en altura, la cual se traduce en una infiltración y en niveles subterráneos de agua fresca relativamente estables, generando una recarga subterránea a través de los abanicos aluviales hacia la zona marginal o de mezcla, tal como se muestra en la Figura 4-3.

Al enfrentarse el flujo de agua dulce con la salmuera, se origina una interfaz en donde la primera masa de agua asciende, aflorando y siendo afectada de manera importante por la evaporación del

lugar, mientras que el remanente genera cuerpos de agua con niveles relativamente estables, los cuales dependen de dicha recarga subterránea.

Finalmente, en el núcleo del salar existen niveles de agua someros y estables con una elevada densidad característica de la salmuera, siendo afectados en menor medida por la evaporación del lugar, y existiendo ocasionalmente recarga y escorrentía superficial desde la zona marginal disolviendo ciertas partes de la costra salina del núcleo.

Figura 4-3: Esquema del modelo conceptual de referencia



Fuente: Marazuela et al (2018).

- Discretización espacial del modelo

Se consideró una extensión horizontal de 10 km con un espesor total de 100 m, donde la discretización de la grilla en la dirección horizontal corresponde a 50 m generando 200 columnas, mientras que en la vertical se tienen 20 capas con un espesor de 5 m cada una de ellas, teniendo una relación $\Delta x: \Delta y = 10$. En la última capa se consideró un espesor variable debido a la topografía, donde se asumió una pendiente de 0.4% teniendo como origen el punto en que terminan las lagunas, y alcanzando una cota máxima de 118 m en el borde del modelo asociado a la recarga de agua fresca. En la dirección transversal se considera solo 1 celda con un espesor de 50 m, debido a que corresponde a un perfil en dos dimensiones.

- Propiedades hidráulicas

Con respecto al material considerado, se asumió una conductividad hidráulica de 100 m/d con una anisotropía transversal de 1 y una relación entre la conductividad horizontal y vertical de 3.

La porosidad se asumió igual a 30%, mientras que la dispersividad horizontal se consideró igual a 25 m dadas las restricciones del número de Péclet con la discretización horizontal. Con respecto a la dispersión transversal y vertical, se consideraron valores para cada una de ellas dadas por las razones entre la dispersividad transversal y horizontal de 0.1, teniendo un valor de 2.5 m, mientras que la relación entre la dispersividad vertical y horizontal es de 0.01, teniendo un valor de 0.25 m. A priori, no se considerará un coeficiente de difusión molecular siendo despreciable dado el valor utilizado para la dispersión hidrodinámica.

- Condiciones de borde

En el lado de la salmuera, se consideró una carga hidráulica constante y con valor igual a 100 m (superficie del modelo), donde se asume además en todo el borde una concentración constante de 300 g/l, asociado a una densidad de 1,200 kg/m³.

Por otro lado, en borde de agua dulce se considera una carga hidráulica constante y con valor de 112 m, representando la recarga subterránea del sistema. Además, se asume una concentración constante de 0 g/l, por lo que el agua de la recarga corresponde a agua fresca asociada a una densidad de 1,000 kg/m³. siendo la densidad referencial para el modelo.

Para representar las lagunas, se consideró una condición de dren con una elevación dada por la cota de superficie menos la profundidad del cuerpo de agua, para la cual se asumió un valor de 1 m.

- Evaporación

En base a los modelos conceptuales revisados, se tiene que en la zona marginal del salar la evaporación juega un rol importante, siendo considerablemente mayor en la zona marginal que en el núcleo salino, puesto que la concentración de solutos afecta significativamente la tasa de evaporación de dichas aguas.

Con ello, en el sector de la salmuera (zona de evaporación 1) se consideró una tasa de evaporación de 0.5 mm/d con una profundidad de extinción de 1 m, mientras que para la zona de posibles afloramientos (zona de evaporación 2) se considera una tasa de 5 mm/d y una profundidad de extinción de 0.5 m, valores según las referencias de los trabajos realizados en la zona.

- Condición inicial y temporal

Para los niveles iniciales, se consideró como altura piezométrica inicial la cota topográfica del sistema, mientras que para el modelo de transporte se consideró una concentración inicial del sistema de 0 g/l. El tiempo de simulación del modelo debe ser el suficiente para alcanzar un estado estacionario en las concentraciones y niveles del sistema, para lo cual se consideró 200,000 días, divididos en 10,000 pasos de tiempos. En el caso del modelo de transporte, la discretización temporal de cada uno de los pasos de tiempo se ajusta automáticamente para cumplir diversos criterios de convergencia y estabilidad mencionados anteriormente.

- Configuración SEAWAT

Dado el acople que existe entre el modelo de flujo dado por MODFLOW y el de transporte dado por MT3DMS, para este último se consideraron los paquetes de advección, dispersión y el de fuente/sumidero.

En el caso de SEAWAT, se activó el paquete de flujo con densidad variable (VDF), además de la variable auxiliar para MODFLOW para la asignación de la densidad del fluido en las condiciones de carga constante (CHDDENSOPT y CHDDEN).

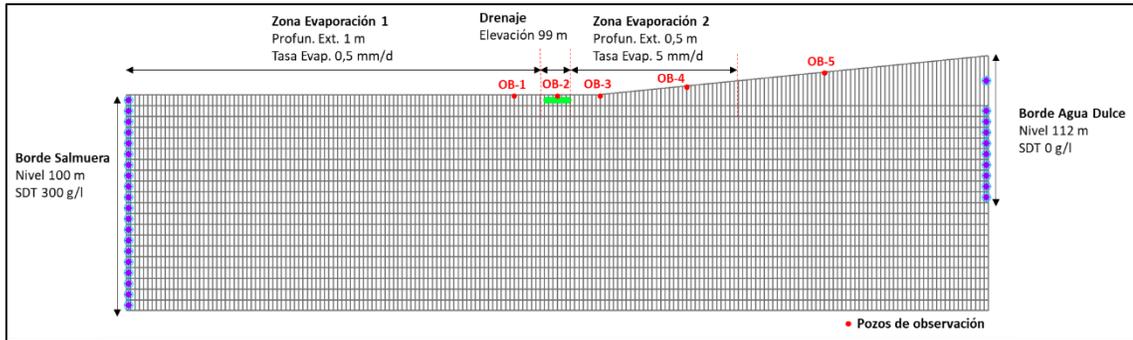
Dentro del paquete VDF, se consideró una relación entre densidad y concentración (DRHODC) igual a 0.6667, obtenida de las condiciones de borde del modelo.

- Pozos de observación

Para realizar los análisis, se considerarán 5 pozos de observación ubicados en los alrededores de la laguna y tratando de abarcar la mayor extensión posible de la cuña salina, los cuales se ubican a 4,500 – 5,000 – 5,500 – 6,500 -8,000 m del borde salmuera, con el fin de evaluar cambios en profundidad de la interfaz salina.

En la Figura 4-4 se muestra un esquema del modelo numérico construido para el modelo base I.

Figura 4-4: Esquema del modelo base I



Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Resultados modelo base I

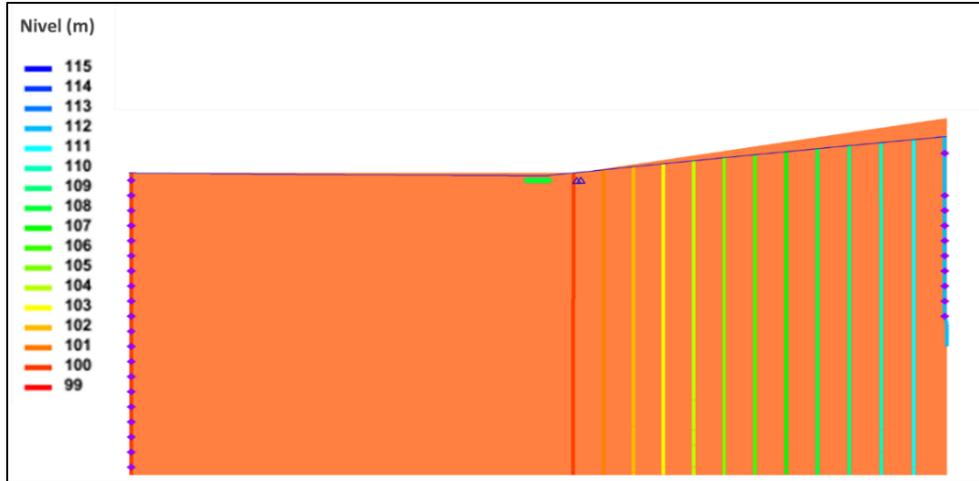
- Resultado de flujo sin considerar densidad variable

Al simular el modelo sin considerar el efecto de la densidad variable, se tiene una distribución de niveles que representa la hidroestática de un acuífero tradicional de agua dulce, como se aprecia en la Figura 4-5, donde las líneas de flujo convergen en la salida dada por la condición de dren.

Además, y si se considera el modelo de transporte, se evidencia un nulo efecto de la concentración en la carga hidráulica, existiendo un quiebre brusco y vertical en los valores de la variable de transporte sin existir una zona de transición debido a la distribución de los niveles piezométricos, tal como se observa en la Figura 4-6.

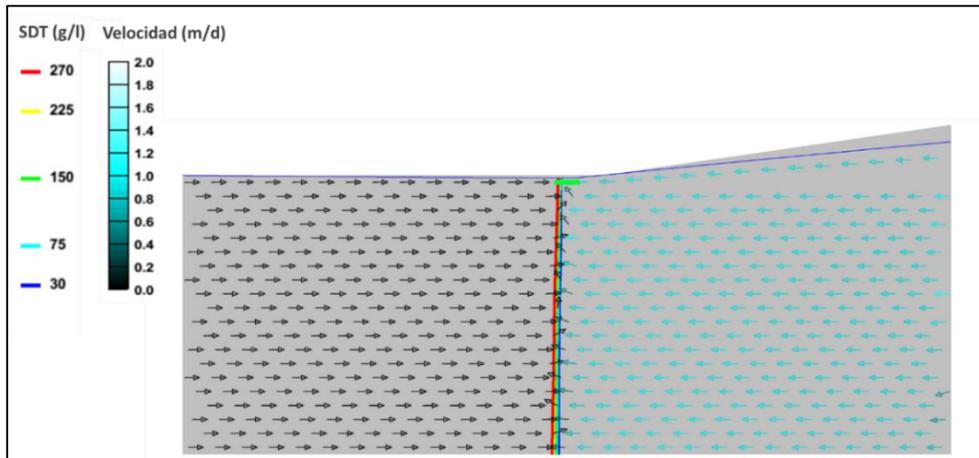
En el caso de la distribución de velocidades, en la Figura 4-6 se aprecia el enfrentamiento de dos campos de velocidad producto de las dos condiciones de borde (salmuera y agua dulce), donde en la zona de condición de dren el agua asciende para salir del sistema. Cabe destacar la diferencia en las magnitudes de las velocidades, siendo mayores en la condición de borde de agua dulce que en la de salmuera debido al gradiente hidráulico generado producto de los niveles impuestos.

Figura 4-5: Distribución niveles piezométricos (m) - Caso Base I - Sin considerar densidad variable



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-6: Distribución de los vectores de velocidad (m/d) e isolíneas de concentración SDT (g/l) - Caso Base I – Sin considerar densidad variable

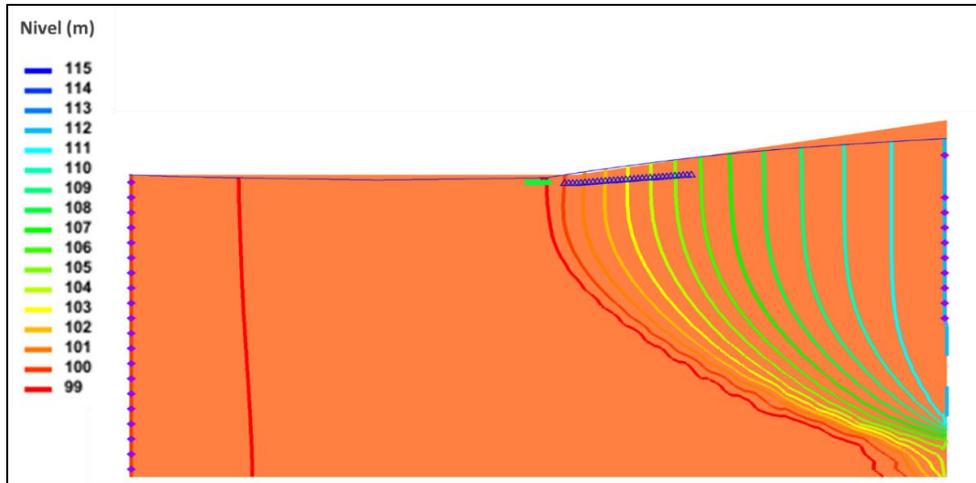


Fuente: Elaboración propia.

- Resultado de flujo considerando densidad variable

En caso de considerar flujo con densidad variable, se tiene un efecto importante de la concentración de soluto en la evolución y distribución de los niveles y SDT del estado estacionario, donde se aprecia una interfaz clara con su respectiva zona de mezcla, además de un potencial afloramiento de aguas producto de la cuña salina en la zona de evaporación 2, como se puede observar en las Figura 4-7 y Figura 4-8.

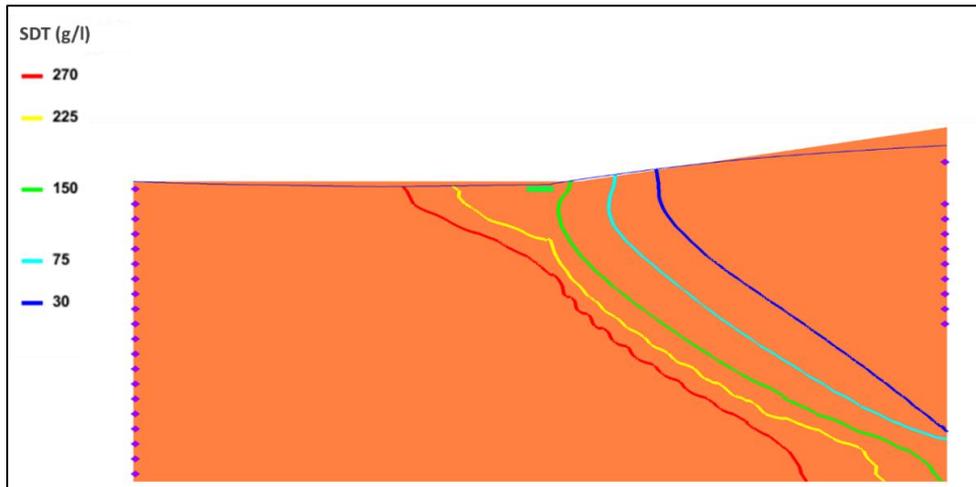
Figura 4-7: Distribución niveles piezométricos (m) - Caso Base I – Considerando densidad variable



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-8 se muestra las isólinas de concentración de SDT para valores de 270, 225, 150, 75 y 30 g/l, los cuales representan respectivamente el 90%, 75%, 50%, 25%, 10% de la concentración asociada al borde de salmuera igual a 300 g/l, las cuales se utilizarán para realizar los análisis posteriores.

Figura 4-8: Isólinas de concentración SDT (g/l) - Caso Base I - Considerando densidad variable

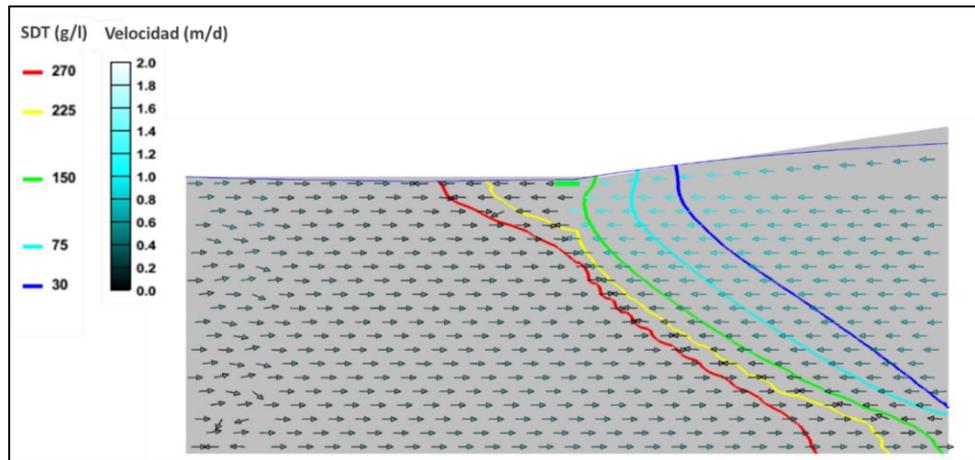


Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los vectores de velocidad, en la Figura 4-9 se puede apreciar el efecto de la distribución de SDT y de la cuña salina, donde el agua dulce al enfrentarse con la interfaz asciende hacia las salidas del modelo dadas por los drenes y las zonas de evaporación. En el caso de las magnitudes, se tiene una mayor velocidad aguas arriba de las condiciones de dren, mientras que en el lado de la salmuera las velocidades son prácticamente nulas. Cabe destacar que en la zona inferior izquierda del modelo (borde salmuera), se notan ciertas distorsiones en los vectores, lo cual puede dar cuenta de una celda convectiva en el lugar.

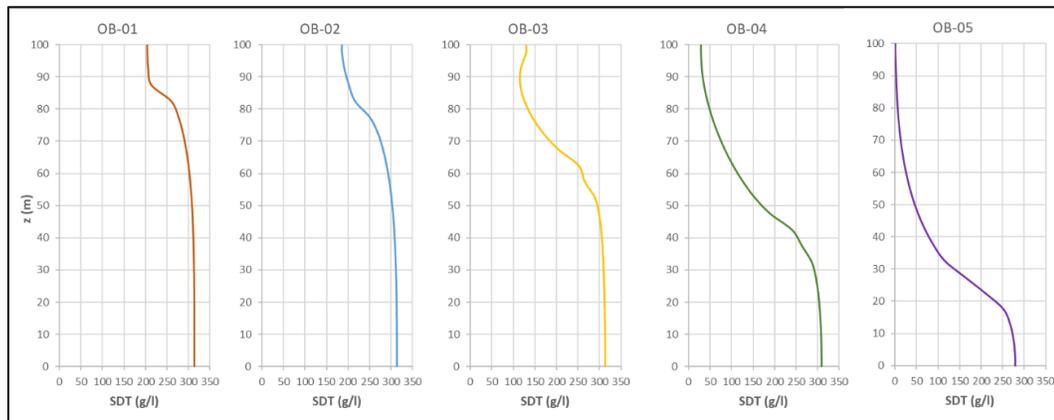
En la Figura 4-10 se presenta la distribución en profundidad de la concentración de SDT (g/l) para los pozos de observación, donde se aprecia el quiebre dado por la interfaz salina, siendo similares a los registros presentes en trabajos realizados en el Salar de Atacama.

Figura 4-9: Distribución de los vectores de velocidad (m/d) e isolíneas de concentración SDT (g/l) - Caso Base I - Considerando densidad variable



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-10: Concentración de SDT (g/l) en profundidad para cada pozo de observación – Caso Base I



Fuente: Elaboración propia.

- Comparación de los modelos

Con respecto a los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles piezométricos y las concentraciones de SDT en el modelo, tal como se muestra en la Tabla 4-1, se tiene una diferencia significativa si se considera o no flujo con densidad variable, puesto que en el segundo al no existir procesos relacionados a la densidad el efecto de la evapoconcentración es importante, siendo el transporte preferentemente por advección.

Con respecto a los flujos, en la Tabla 4-2 se puede apreciar un efecto importante en los flujos de entrada por las condiciones de borde tanto de la salmuera como del agua dulce, además de un efecto en las salidas por la condición de drenaje.

Tabla 4-1: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT - Caso Base I

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base I - Sin VDF	99.0	112.0	-0.8	1163.7
Caso Base I – Considerando VDF	96.3	112.0	0.0	325.1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-2: Flujos netos a través de las condiciones de borde - Caso Base I

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base I - Sin VDF	0.031	0.324	-0.013	-0.024	-0.318
Caso Base I – Considerando VDF	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110

Fuente: Elaboración propia.

Al considerar las variables adimensionales detalladas para el análisis de los modelos, en la Tabla 4-3 se puede ver un efecto importante en el espesor de la zona de mezcla, donde si no se considera la densidad variable el espesor no se puede determinar (al igual que la pendiente), además de existir una relación importante entre los flujos de entrada tanto del salar como desde la recarga. Por otro lado, no se pueden obtener los parámetros Co y α debido a que no existen diferencias de densidad en el caso sin VDF.

Tabla 4-3: Variables adimensionales de interés - Caso Base I

Modelo	Parámetro Co	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base I - Sin VDF	-	-	0.510	0.510	-	0.097	indefinido
Caso Base I – Considerando VDF	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Análisis de las variables relacionadas a la construcción de modelos

Para evaluar las variables y aspectos relacionadas a la construcción de modelos de flujo con densidad variable, éstas se dividieron en dos grupos, siendo Efectos de la configuración de la grilla y Efectos de las condiciones de borde. Dentro del primer grupo, las variables a evaluar corresponde a: Espesor del modelo – Discretización espacial horizontal – Discretización espacial vertical – Refinamiento general de la grilla. En el caso de las condiciones de borde, estas corresponde a: Densidad mínima y máxima – Extensión de condición de borde – Considerar flujo en vez de carga constante – Efecto concentración mínima en transporte.

Los resultados del análisis de las variables y aspectos relacionados a la construcción de los modelos mencionados se encuentran detallados en el Anexo A, donde se evalúan tanto los flujos, variables adimensionales, como la distribución de la concentración de soluto.

Con respecto al proceso de construcción de los modelos, primero se tiene que el espesor del modelo influye en los efectos que pudiera tener la condición de borde en el fondo (en general de no flujo) sobre la interfaz salina, donde la cuña salina se encuentra completamente desarrollada dentro de los límites del modelo además de mejorar la representación de ésta generándose isolíneas de concentración más suaves, aunque cabe destacar que la forma general de la zona de mezcla no se ve alterada. Por lo tanto, y según la información disponible, es recomendable considerar el mayor espesor posible del acuífero sin asumir a priori una distancia a la cual se consideran despreciables los efectos del fondo, permitiendo el completo desarrollo de la interfaz salina.

Ahora, y con respecto a la discretización de la grilla, se tiene que la discretización vertical tiene un mayor impacto que la discretización horizontal en la representación de la interfaz salina, lo cual también está ligado con la formulación matemática del problema puesto que los efectos de la diferencia de densidad en la ecuación de continuidad se encuentran en la dirección vertical. Con esto, la discretización debe ser tal que se cumplan los criterios de estabilidad numérica como también sean lo suficientemente fina (sobre todo en la dirección vertical) para que la representación de la interfaz sea adecuada.

En el caso de las condiciones de borde y la configuración de ciertos parámetros, primero se tiene que, al acotar la densidad tanto para un valor mínimo como un valor máximo, en el caso del segundo se genera un aumento considerable de la concentración máxima de SDT, existiendo una acumulación de soluto poco realista en el Borde Salmuera, aunque manteniendo la forma de la interfaz salina. Con esto, no es recomendable acotar la densidad por un valor mínimo o máximo según lo descrito en el respectivo modelo conceptual.

Al analizar el efecto de considerar una concentración constante en el fondo del modelo representando la salmuera del sistema, se tiene que los tiempos para alcanzar el estado estacionario disminuyen y los efectos sobre la interfaz salina son despreciables, salvo cuando la extensión de la condición de borde en el fondo alcanza la distancia a la cual se ubica la zona de mezcla, puesto que la altera y condiciona en profundidad, pudiendo no ser fidedigna la representación. Por lo tanto, y si no se tiene certeza de la ubicación de la interfaz salina en profundidad, no es recomendable extender la concentración del borde salmuera en el fondo del modelo.

Con respecto a la extensión de la condición de borde de agua dulce en profundidad, se tiene que no genera un impacto significativo en la interfaz salina ni en el equilibrio del sistema, salvo cuando la extensión de la condición de borde de agua dulce alcanza la zona de mezcla en profundidad, siendo afectada por dicha condición de borde. En consecuencia, y teniendo un conocimiento aproximado de la ubicación de la interfaz salina en profundidad, es recomendable que la condición de borde de agua dulce esté contenida dentro de la probable extensión de la zona de mezcla y no abarcarla completamente.

En el caso de reemplazar la condición de borde de carga constante por una condición de flujo, se tiene que no existen diferencias significativas entre ambos modelos siendo equivalentes, por lo que, en caso de tener un conocimiento acabado del sistema, se recomienda elaborar un modelo basado en los flujos entrantes en vez que niveles conocidos, con el fin de evaluar mejor posibles cambios en el sistema.

Finalmente, y en caso de considerar una concentración mínima e inicial en el modelo de transporte distinta de cero, se tiene que ésta no afecta el desarrollo de la interfaz salina ni los resultados en el estado de equilibrio, por lo que se recomienda considerar una concentración distinta de cero debido a los posibles errores numéricos intrínsecos en este tipo de modelos, los cuales carecen de sentido físico.

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y ESTUDIO DE LA INTERFAZ SALINA

5.1. Aspectos generales

Para realizar el análisis del comportamiento de la interfaz salina, primeramente se realizarán modificaciones al caso base según los resultados obtenidos en el Capítulo 4, con el fin de evaluar otras variables como lo sería la recarga subterránea de agua dulce.

Posteriormente, se definen los parámetros a evaluar, donde se comparan los resultados para cada uno de ellos según las variables definidas para el análisis de la interfaz salina, definiendo relaciones entre ellas como también el impacto de cada uno de los parámetros en las variables para el estudio de la interfaz salina.

Finalmente, se realizará una extensión del perfil hacia un modelo 3D, donde se replicarán algunos de los resultados obtenidos previamente.

5.2. Construcción modelo base II

5.2.1. Descripción modelo base II

Para definir el modelo base II de estudio de la interfaz salina, se realizan modificaciones al modelo base I según los resultados obtenidos en el Capítulo 4.

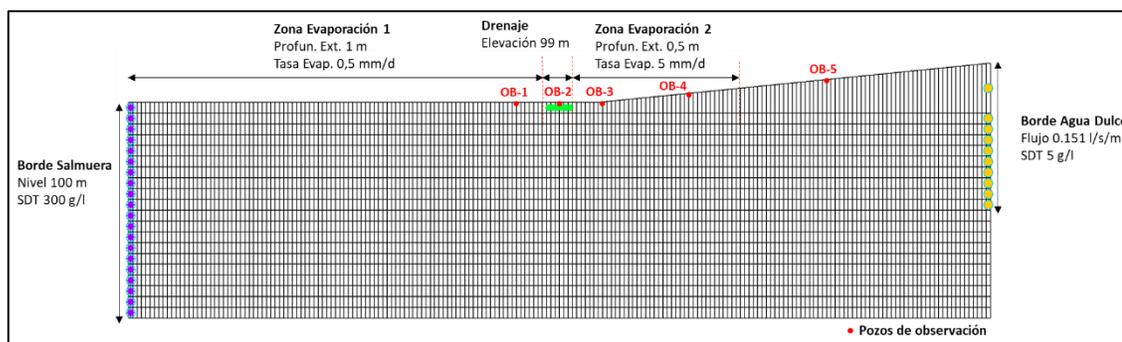
Uno de los cambios corresponde a la condición de borde de agua dulce, puesto que se pasa de una carga hidráulica constante a un flujo de entrada definido según el resultado del modelo base I, siendo un flujo total de 0.151 l/s/m. Esto es para evaluar el efecto debido a una disminución de los caudales de entrada en el sistema, lo cual no se podría comprobar si se considera una carga constante en dicho borde.

Junto con lo anterior, se define una concentración de entrada igual a 5 g/l para la condición de borde de flujo en la recarga, además del mismo valor para la concentración inicial en todo el modelo, con el fin de evitar concentraciones negativas debido a la posible dispersión numérica.

Con respecto al resto de las configuraciones, éstas se consideran invariantes del caso base I, puesto que no influyen en mayor medida con el resultado, y la interfaz desarrollada es adecuada para su posterior evaluación.

Con esto, el esquema conceptual del modelo base II se muestra en la Figura 5-1.

Figura 5-1: Esquema conceptual del modelo base II

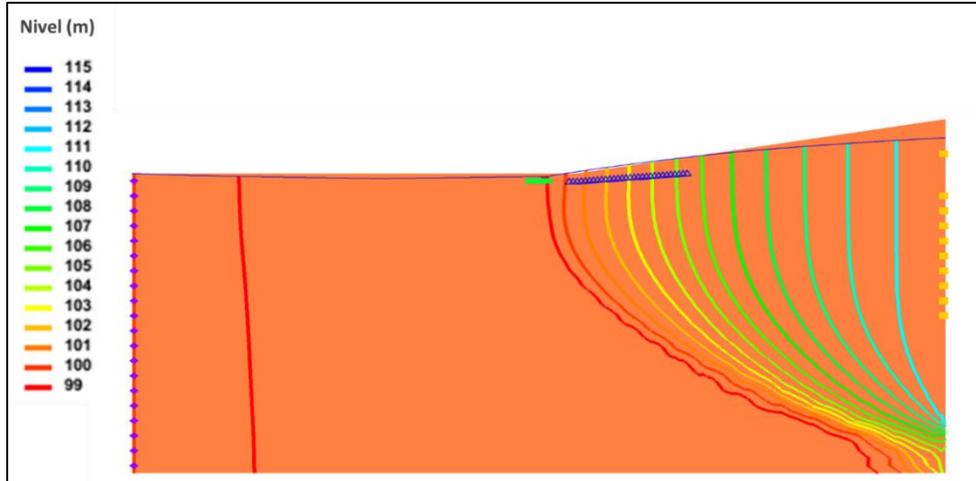


Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Resultados modelo base II

Dado que las variaciones son mínimas con respecto al modelo base I, se observa un comportamiento similar entre ambos casos, teniendo una interfaz salina desarrollada con su respectiva zona de mezcla, además de un potencial afloramiento de aguas producto de la cuña salina en la zona de evaporación 2 tal como se puede observar en las Figura 5-2 y Figura 5-3.

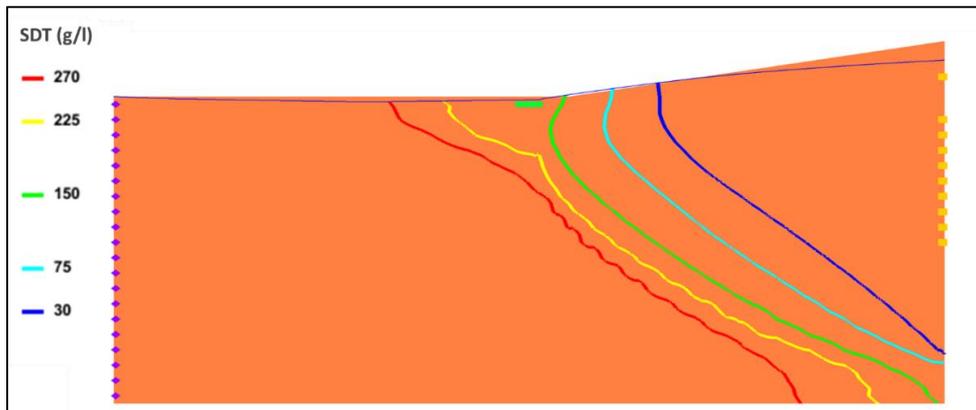
Figura 5-2: Distribución niveles piezométricos (m) - Caso Base II



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-3 se muestra las isolíneas de concentración de SDT para valores de 270, 225, 150, 75 y 30 g/l, los cuales representan respectivamente el 90%, 75%, 50%, 25%, 10% de la concentración asociada al borde del Salar igual a 300 g/l, las cuales se utilizarán para realizar los análisis posteriores.

Figura 5-3: Isolíneas de concentración SDT (g/l) - Caso Base II

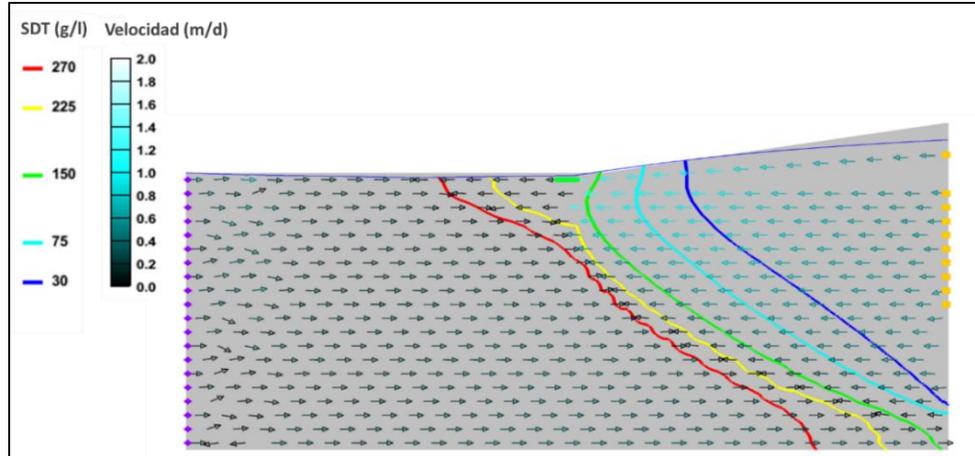


Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los vectores de velocidad, en la Figura 5-4 se puede apreciar el efecto de la distribución de SDT y de la cuña salina, siendo similares al caso base I.

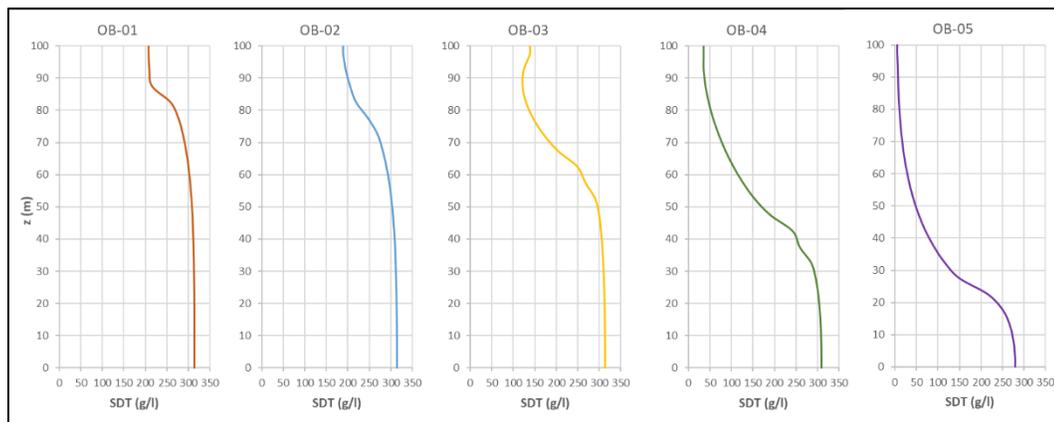
En la Figura 5-5 se presenta la distribución en profundidad de la concentración de SDT (g/l) para los pozos de observación, donde se aprecia el quiebre dado por la interfaz salina siendo similares a los registros presentes en trabajos anteriores.

Figura 5-4: Distribución de vectores de velocidad (m/d) e isóneas de concentración SDT (g/l) - Caso Base II



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-5: Concentración de SDT (g/l) en profundidad para cada pozo de observación – Caso Base II



Fuente: Elaboración propia.

- Comparación de los modelos base

Con respecto a los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles piezométricos y las concentraciones de SDT en el modelo Caso Base II tal como se muestra en la Tabla 5-1, no existe una gran diferencia con el Caso Base I, siendo el cambio importante en la concentración mínima de SDT, dado que se modificó la condición de borde.

Ahora, y al analizar los flujo en la Tabla 5-2, se tiene que no existen diferencias en las tasas por las condiciones de borde, lo cual también se corrobora con los parámetros Co , α y R_D de la Tabla 5-3.

Tabla 5-1: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT - Caso Base II

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base I	96.3	112.0	0.0	325.1
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-2: Flujos netos a través de las condiciones de borde - Caso Base II

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base I	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111

Fuente: Elaboración propia.

Al considerar las variables adimensionales detalladas para el análisis de los modelos, en la Tabla 5-3 se puede ver un nulo cambio entre el modelo base I y el modelo base II, generando ambos casos una interfaz salina similar. Por lo tanto, se tiene que ambos modelos representan una interfaz salina equivalente.

Tabla 5-3: Variables adimensionales de interés - Caso Base II

Modelo	Parámetro C_o	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base I	95.1	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
Caso Base II	95.3	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Parámetros a evaluar

Para evaluar el efecto de las distintas propiedades y parámetros del problema, se realizará un estudio de la interfaz para cada una de ellas detectando tanto su influencia en el resultado de flujo como en la de transporte, además del impacto que tienen en la zona de mezcla. En la Tabla 5-4 se muestran los valores para cada uno de los casos simulados.

Tabla 5-4: Estudio de la interfaz – Casos de estudio

Parámetro\Modelo	Caso Base II	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Permeabilidad (m/d)	100	25	50	75	125	150	200
Flujo Borde Agua Dulce (m ³ /d)	650.67	162.7	325.3	488.0	813.3	976.0	1,301.3
Dispersividad Longitudinal (m)	25	6.25	12.50	18.75	31.25	37.50	50.00
Dispersividad Vertical (m)	0.25	0.065	0.125	0.1875	0.3125	0.375	0.5
Dispersividad Longitudinal - Vertical (m)	25 - 0.25	6.25 - 0.065	12.5 - 0.125	18.75 - 0.1875	31.25 - 0.3125	37.5 - 0.375	50 - 0.5
Anisotropía Vertical Kh/Kv (-)	3	0.75	1.50	2.25	3.75	4.50	6.00
Tasa Evaporación Zona Evap. 1 (m/d)	0.0005	0.00013	0.00025	0.00038	0.00063	0.00075	0.001
Tasa Evaporación Zona Evap. 2 (m/d)	0.005	0.0013	0.0025	0.0038	0.0063	0.0075	0.01
Porosidad (-)	0.30	0.075	0.15	0.23	0.38	0.45	0.60
Carga Borde Salmuera (m)	100	98	98.5	99	99.5	99.75	100.25
SDT Borde Salmuera (g/l)	300	75	150	225	375	450	600
$\partial\rho/\partial C$ (-)	0.67	0.43	0.55	0.61	0.73	0.79	0.91

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Comportamiento y análisis de la interfaz salina frente a los distintos parámetros

Utilizando las variables definidas para el análisis de la interfaz salina, se considerarán los parámetros definidos en la Tabla 5-4 para comparar los resultados de los distintos casos, además de determinar el impacto de cada parámetro en la interfaz salina y las relaciones entre ellas. En el Anexo B se presentan los resultados y análisis en detalle para cada parámetro, donde se evalúan tanto los flujos, las variables adimensionales, como también la distribución de la concentración de soluto.

Dentro de los principales resultados en lo que respecta a la forma de la interfaz salina, primero se tiene que parámetros como la porosidad y la anisotropía no tienen un efecto significativo, manteniendo la forma de la interfaz salina y los flujos de salida.

Por otro lado, en el caso del flujo de agua dulce, la conductividad hidráulica, y la dispersividad, estos sí afectan de manera importante la dinámica del sistema, controlando la forma de la interfaz salina. Con respecto a la recarga de agua dulce y la conductividad hidráulica, se observa que afectan de manera similar las variables analizadas y la zona de mezcla, donde el efecto tiene que ver más con los niveles que se alcanzan en el sistema en donde se impone el flujo de entrada, quedando determinada la forma de la interfaz salina por la diferencia de energías de ambas condiciones de borde y el enfrentamiento entre el agua dulce y la salmuera, además del alcance que tiene la zona de mezcla.

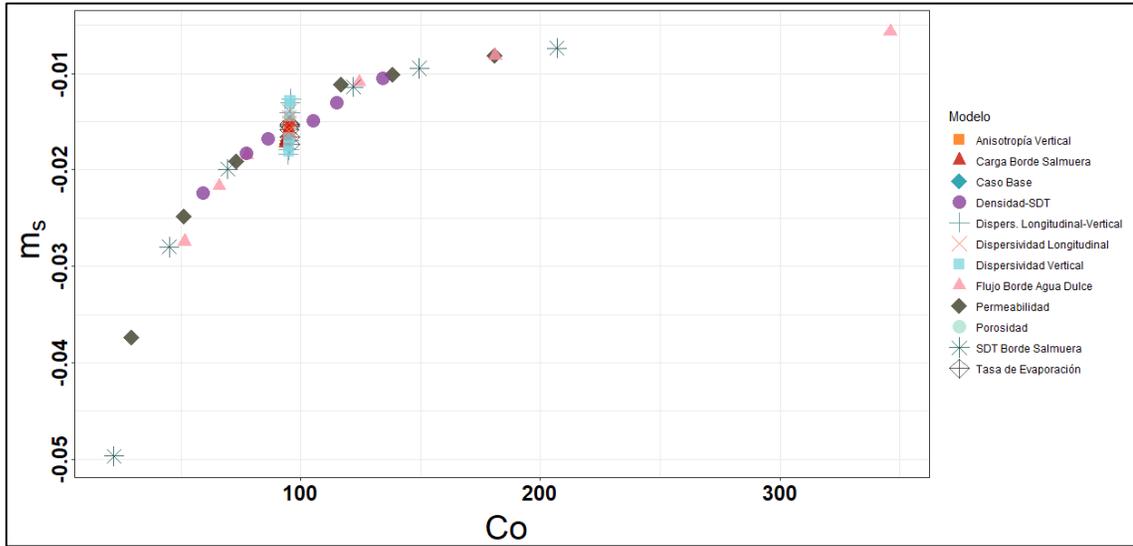
En cambio, y al considerar la dispersividad vertical, se tiene que ésta afecta de manera importante la interfaz salina, donde a pesar de que los niveles piezométricos que alcanzan los distintos casos evaluados son similares, existen variaciones importantes en la interfaz salina, lo cual es consistente con estudios anteriores, donde el espesor de la zona de mezcla depende de la dispersividad.

En el caso de la tasa de evaporación, se tiene que provoca diferencias en el alcance de la interfaz salina en superficie, en donde el rol de la evapoconcentración es importante.

Ahora, y al analizar los parámetros adimensionales, con respecto al comportamiento de la interfaz frente a los distintos parámetros, primero se tiene que al comparar la pendiente m_s con el parámetro Co como se muestra en la Figura 5-6, se ve que existe una clara tendencia creciente entre ellas, donde para el caso de las dispersividades el efecto sobre la pendiente no está relacionado directamente con el parámetro Co sino que íntegramente por el valor que adquiere la dispersividad. Con esto, el parámetro Co resulta ser un indicador de que tan pronunciada puede ser la pendiente de la interfaz salina.

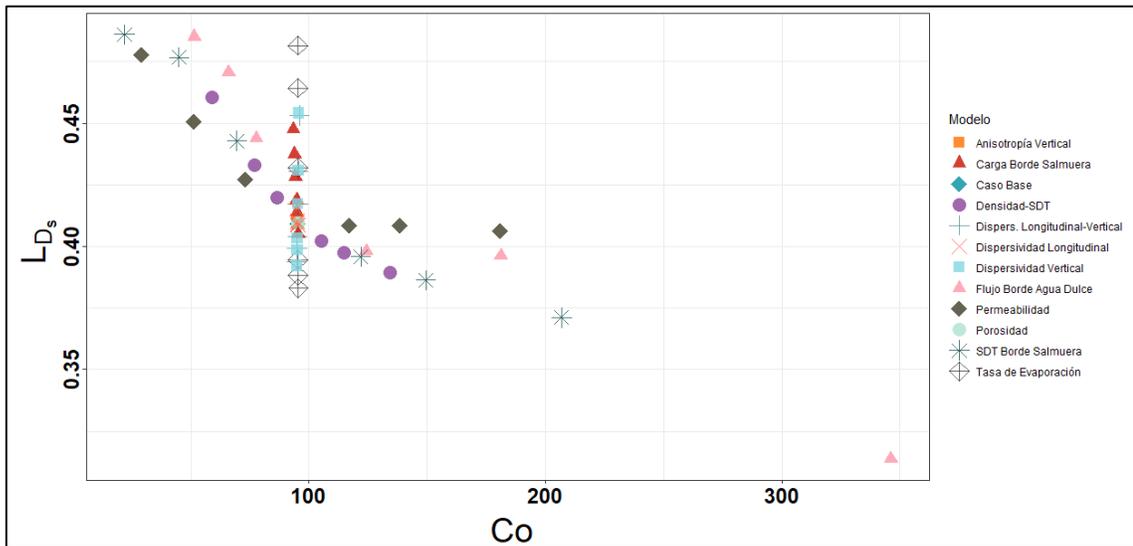
Ahora, y si se comparan los parámetros del alcance de la interfaz salina dados por L_{D_s} y L_{D_i} con el parámetro Co como se muestra en las Figura 5-7 y Figura 5-8, se tiene que existe una tendencia decreciente si se omiten los modelos de Dispersividad, Carga en el Borde Salmuera y Tasa de Evaporación, donde en estos dos últimos el principal proceso que altera la interfaz corresponde a la evapoconcentración. Por lo tanto, y a medida que el parámetro Co aumenta, la zona de mezcla alcanza mayores distancias en superficie y menores en profundidad.

Figura 5-6: Relación entre los parámetros - m_s y Co



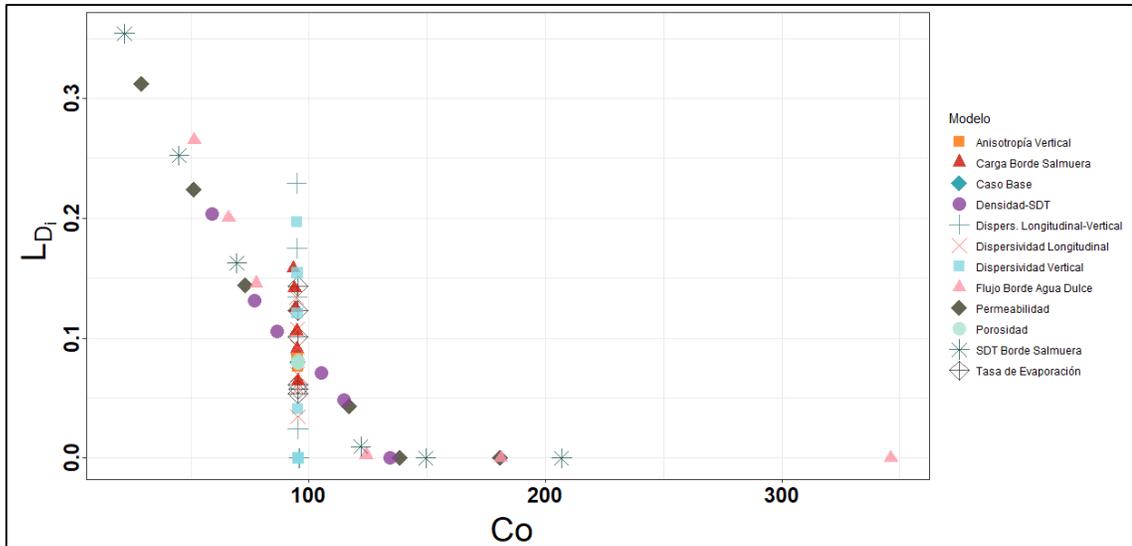
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-7: Relación entre los parámetros - LD_s y Co



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-8: Relación entre los parámetros - L_{D_i} y Co

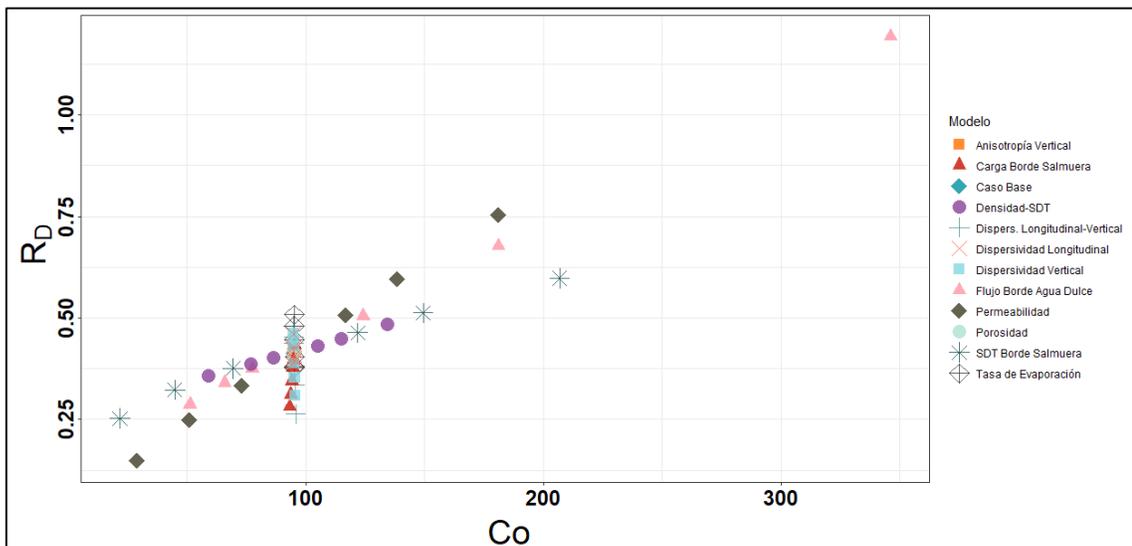


Fuente: Elaboración propia.

En el caso del flujo salino adimensional R_D , se tiene que la relación con el parámetro Co es creciente como lo muestra la Figura 5-9, siendo mayor el flujo de entrada por el borde salino a medida que aumenta el valor del parámetro Co .

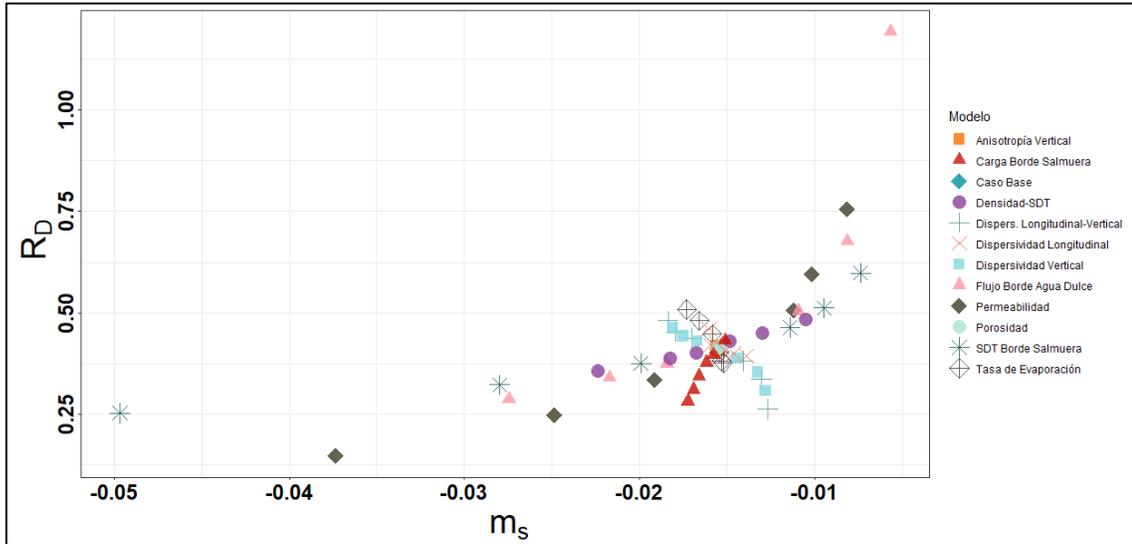
Lo mismo para la relación entre R_D y m_s , donde existe una tendencia creciente a excepción de los modelos de dispersividad y de la tasa de evaporación, como lo muestra la Figura 5-10.

Figura 5-9: Relación entre los parámetros - R_D y Co



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-10: Relación entre los parámetros - R_D y m_s

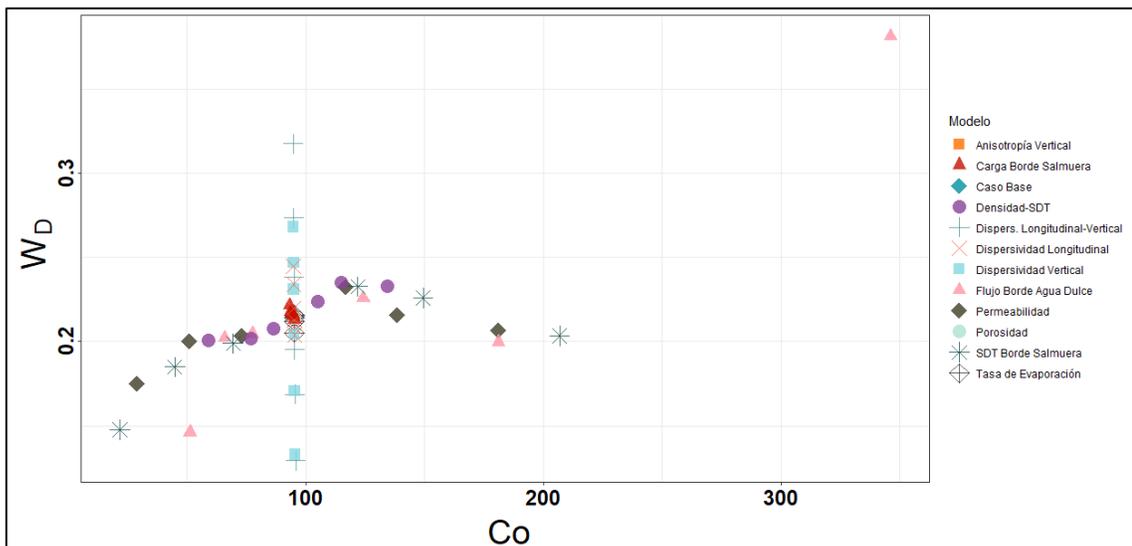


Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la relación entre el espesor W_D y el parámetro Co como se muestra en la Figura 5-11, se tiene que no existe una tendencia clara, siendo levemente creciente, aunque el efecto principal en el espesor está dado para los modelos de dispersividades y en los valores extremos de Co .

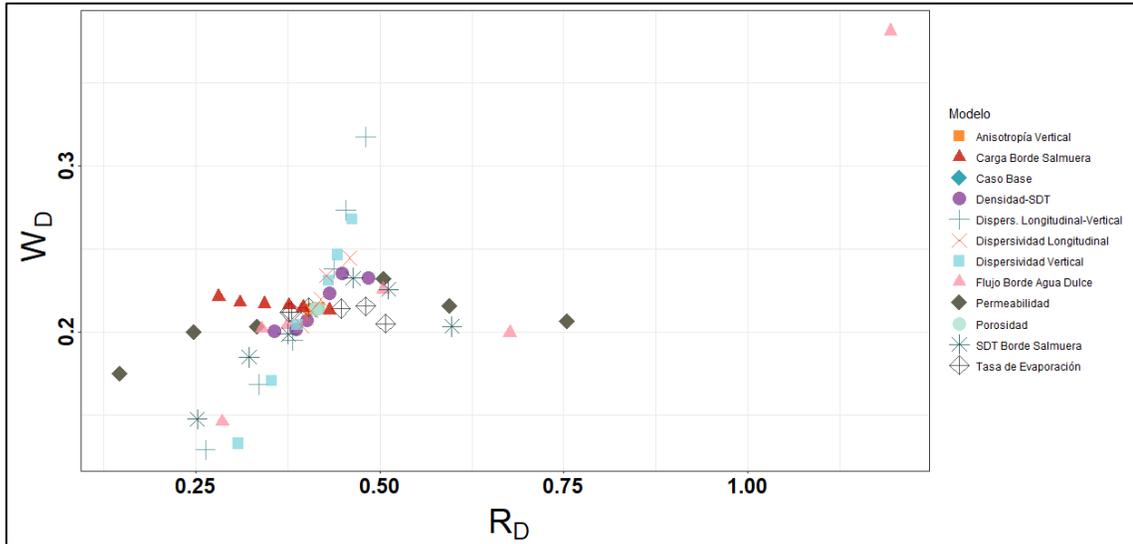
Lo mismo ocurre al relacionar el espesor W_D con el flujo salino adimensional R_D como se muestra en la Figura 5-12, siendo similar el comportamiento al descrito anteriormente.

Figura 5-11: Relación entre los parámetros - W_D y Co



Fuente: Elaboración propia.

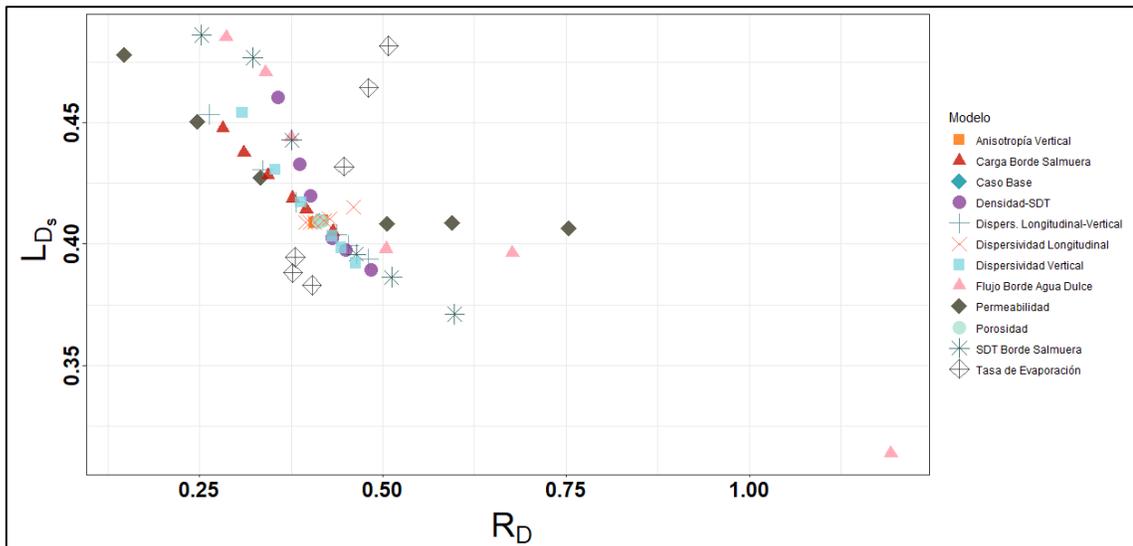
Figura 5-12: Relación entre los parámetros - W_D y R_D



Fuente: Elaboración propia.

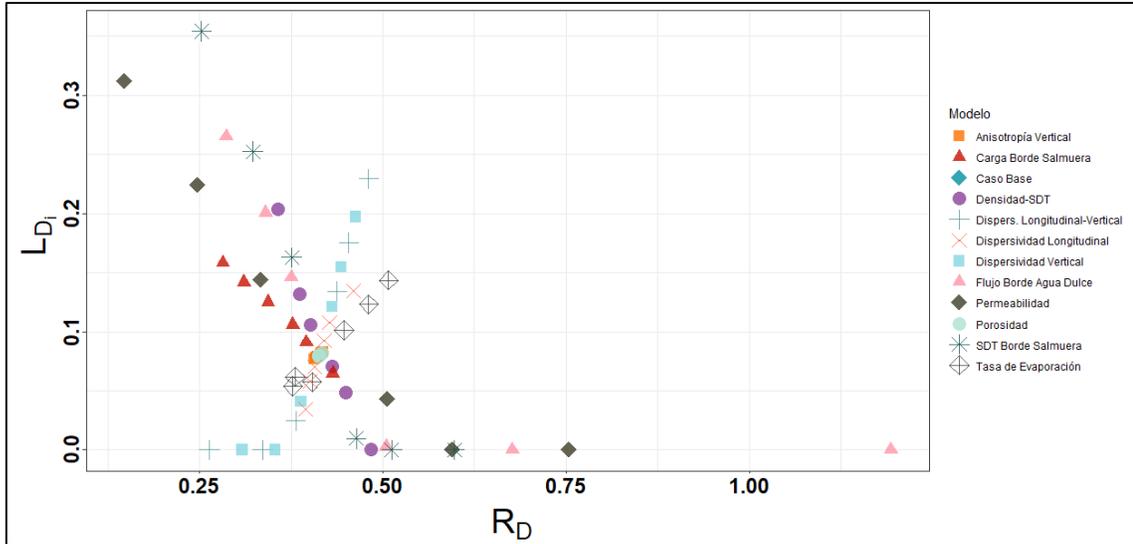
Al comparar el parámetro L_{D_s} con el parámetro R_D como se muestra en la Figura 5-13, se tiene que existe una tendencia decreciente a excepción de la tasa de evaporación, donde en dicho caso la interfaz salina se ve alterada principalmente por la evapoconcentración. En el caso de la Figura 5-14, se muestra la relación entre L_{D_i} y R_D , donde también existe una relación decreciente, aunque no para el caso de las dispersividades y la tasa de evaporación, debido a los efectos que predominan en dichos modelos.

Figura 5-13: Relación entre los parámetros - L_{D_s} y R_D



Fuente: Elaboración propia.

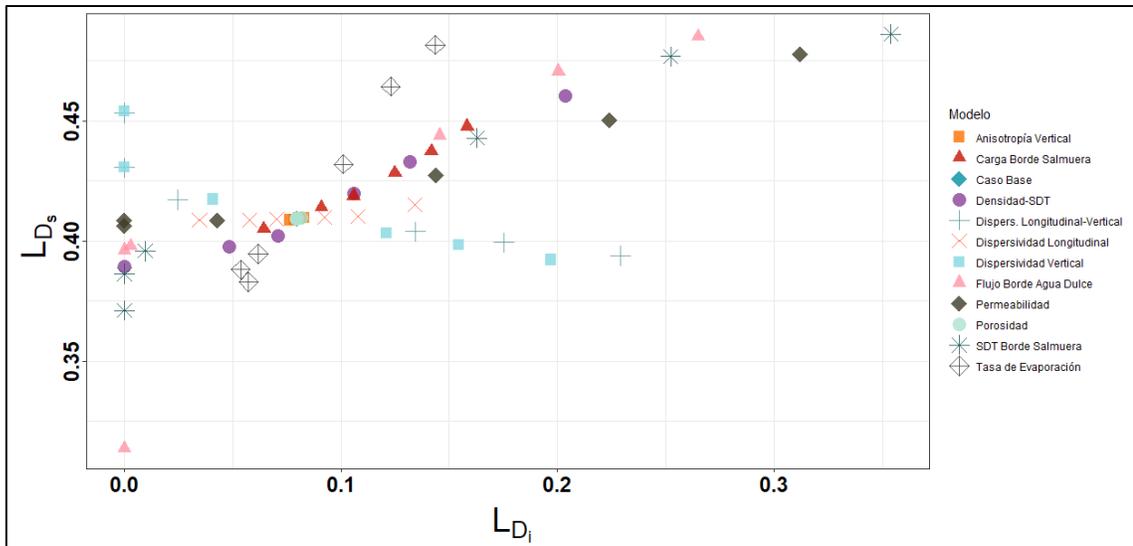
Figura 5-14: Relación entre los parámetros - L_{D_i} y R_D



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, y al comparar los parámetros L_{D_s} y L_{D_i} , en la Figura 5-15 se ve que es creciente a excepción de los modelos donde se modifica el valor de la dispersión vertical, por lo que un desplazamiento en superficie de la interfaz salina indicaría también un desplazamiento de ésta en profundidad.

Figura 5-15: Relación entre los parámetros - L_{D_s} y L_{D_i}



Fuente: Elaboración propia.

5.5. Extensión de resultados de modelo base II a modelo 3D

5.5.1. Descripción modelo 3D

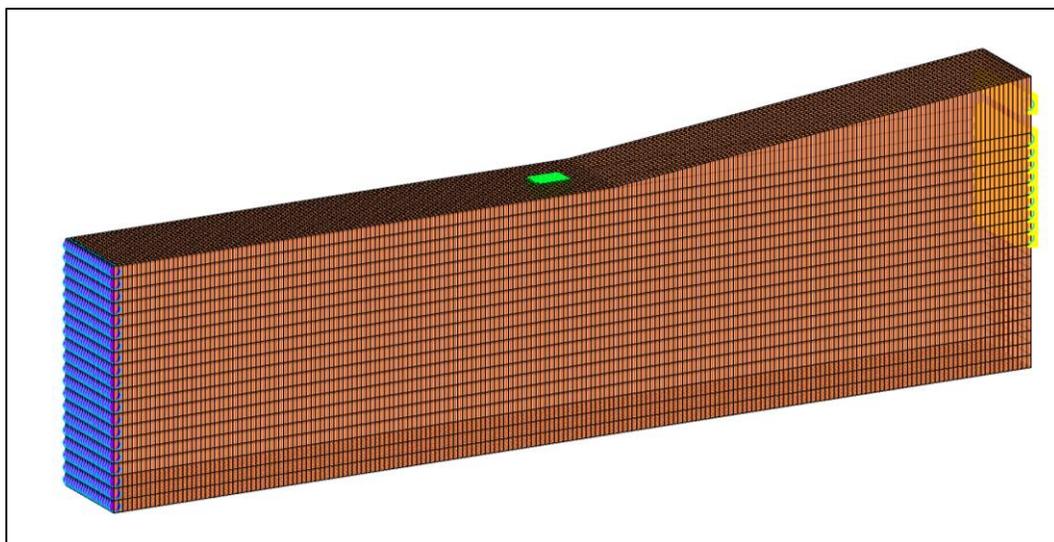
Con el fin de verificar la factibilidad en la construcción de modelos en tres dimensiones de flujo con densidad variable, se extenderá el concepto de modelación de perfiles realizado hasta ahora, tratando de replicar algunos resultados obtenidos, y comprobar si la herramienta computacional utilizada permite el desarrollo de estos modelos. Cabe destacar que, al ser una aproximación de un modelo en tres dimensiones y dado que las dimensiones son acotadas, no se obtienen necesariamente un flujo tridimensional debido a que no se encuentran las condiciones necesarias, siendo la dirección de flujo preferentemente en dos dimensiones, pero sí permite comprobar el comportamiento del programa al extender el dominio de modelación, y el efecto que tienen los bordes laterales en el sistema representado.

Para realizar la extensión del perfil 2D a uno 3D, se construye un modelo replicando en la dirección transversal las condiciones impuestas en los modelos de dos dimensiones hasta abarcar una distancia de 1,000 m, generando un total de 20 filas y aumentando la cantidad total de elementos de la grilla de 4,000 a 80,000 celdas.

Se construyen modelos 3D para corroborar algunos resultados obtenidos en los perfiles 2D del Capítulo 5 de los siguientes casos: (1) Modelo base II; (2) Permeabilidad – Caso 5; (3) Flujo Borde Agua Dulce – Caso 5; (4) Anisotropía Vertical – Caso 1. Para comparar los resultados, se realizarán los mismos análisis hechos anteriormente, donde se considerará el perfil ubicado en el punto medio en la dirección transversal del modelo 3D, correspondiente a una distancia de 500 m desde el costado de éste.

En el caso de los drenes, primero se tiene que, al extenderlos completamente en la dirección transversal en el modelo 3D, las diferencias en la interfaz salina y los flujos son insignificantes con respecto a los perfiles 2D. Con esto, se consideran solo drenes en las 4 filas centrales del modelo, debido a que los posibles cuerpos de aguas no se encuentran completamente extendidos en la dirección transversal, y para evaluar el efecto de los bordes en la solución. En la Figura 5-16 se muestra la geometría del modelo en tres dimensiones.

Figura 5-16: Geometría del modelo 3D

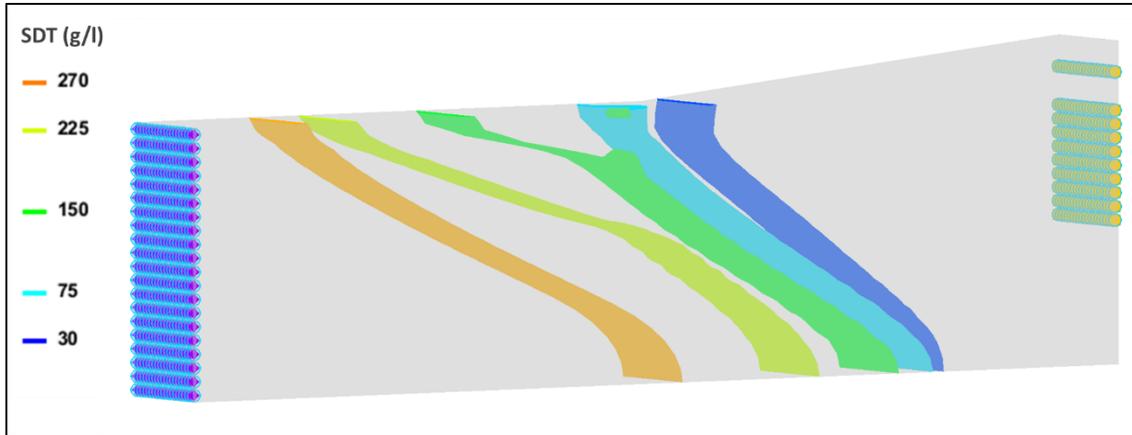


Fuente: Elaboración propia.

Una de las primeras diferencias con respecto al modelo en dos dimensiones corresponde al tiempo de cálculo necesario para cada una de las simulaciones utilizando la misma herramienta computacional, donde para el caso de los perfiles 2D el tiempo de cálculo es entre 1-2 horas, mientras que para el caso de 3D los tiempos son iguales a 70-80 horas, aumentando considerablemente.

En la Figura 5-17 se muestran las superficies con igual concentración de SDT para el modelo en tres dimensiones, donde si se compara con los resultados obtenidos para el perfil en dos dimensiones, se tiene que la cuña salina conserva la misma forma.

Figura 5-17: Isosuperficies de concentración SDT (g/l) – Modelo 3D



Fuente: Elaboración propia.

5.5.2. Modelo base II extendido a modelo 3D

Al comparar los resultados del perfil 2D con su respectiva extensión al modelo 3D para el Caso Base II, primero se tiene que los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT no sufren cambios significativos, tal como se muestra en la Tabla 5-5.

Lo mismo sucede con los flujos netos a través de las condiciones de borde (Tabla 5-6), donde se tiene que aumentan levemente las salidas a través de las zonas de evaporación y disminuyen por la condición de dren, lo cual se debe a la configuración de ésta última, puesto que los niveles piezométricos aumentan en los bordes de la zona de drenaje, teniendo como salida del sistema la evaporación.

En el caso de las variables adimensionales de interés, en la Tabla 5-7 se muestra que tampoco existen diferencias importantes entre el perfil 2D y la extensión del modelo 3D, existiendo un leve desplazamiento hacia el Borde Salmuera, como lo muestran los valores L_{D_s} y L_{D_i} , además de una disminución del flujo salino, como lo muestra el parámetro R_D .

Tabla 5-5: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión 3D - Caso Base II

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
Caso Base II – 3D	96.4	112.1	5.0	324.9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-6: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión 3D - Caso Base II

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Caso Base II – 3D	0.060	0.151	-0.004	-0.106	-0.101

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-7: Variables adimensionales de interés – Extensión 3D - Caso Base II

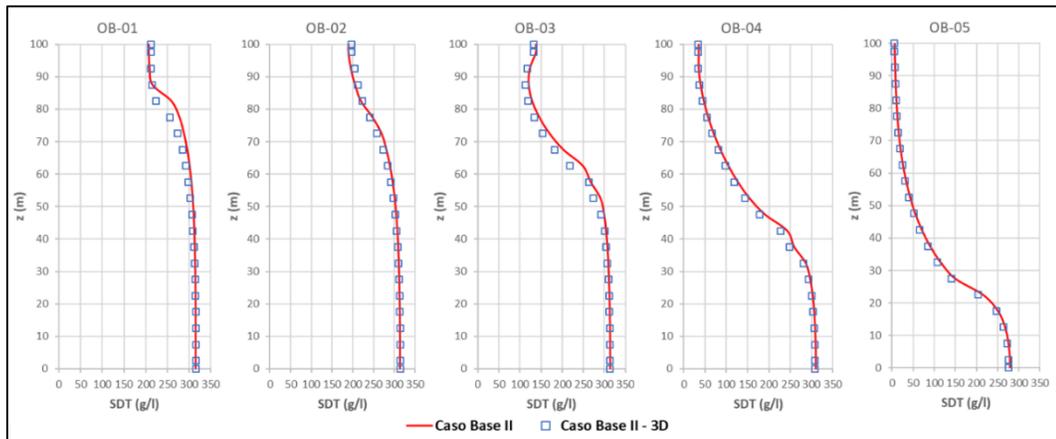
Modelo	Parámetro C_0	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Caso Base II – 3D	95.4	0.007	0.412	0.085	0.217	0.395	-0.015

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-18 se muestran los perfiles de concentración en profundidad, donde las diferencias son leves con respecto al perfil 2D, existiendo un desplazamiento hacia el Borde Salmuera en algunos pozos, además de cambiar la distribución en profundidad en el pozo OB-01.

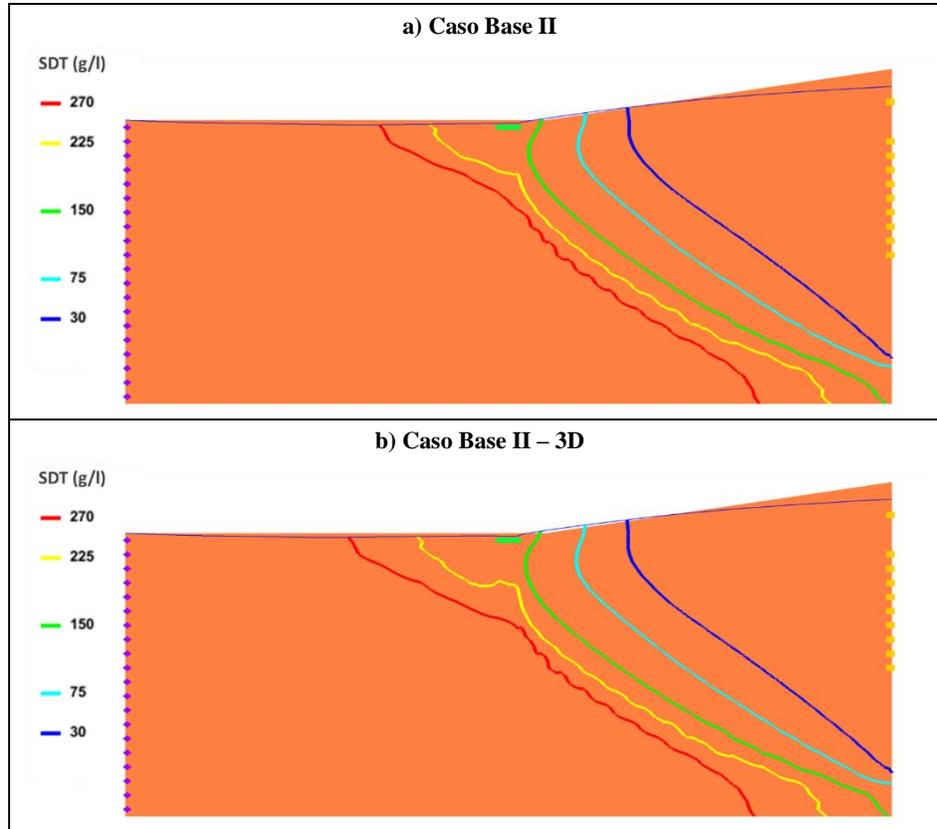
Con respecto a las isolíneas de concentración, en la Figura 5-19 se ve que la interfaz salina mantiene su forma general al extender a modelo 3D, existiendo leves diferencias en las líneas de concentraciones de 225 y 270 g/l en el costado Borde Salmuera y en superficie, lo cual se debe a la evapoconcentración producto del aumento de los niveles piezométricos en los costados de la zona de drenaje, además de un leve alzamiento en profundidad de la línea de concentración de 225 g/l debajo de los drenes.

Figura 5-18: Concentración de SDT (g/l) en profundidad – Extensión 3D - Caso Base II



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-19: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión 3D - Caso Base II



Fuente: Elaboración propia.

5.5.3. Permeabilidad – Caso 5 extendido a modelo 3D

Al comparar los resultados del perfil 2D con su respectiva extensión al modelo 3D para la Permeabilidad – Caso 5, primero se tiene que los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT no sufren cambios significativos, tal como se muestra en la Tabla 5-8.

Lo mismo sucede con los flujos netos a través de las condiciones de borde, donde en la Tabla 5-9 se ve que aumentan levemente las salidas a través de las zonas de evaporación y disminuyen por la condición de dren, lo cual se debe a la configuración de ésta última, puesto que los niveles piezométricos aumentan en los bordes de la zona de drenaje, teniendo como salida del sistema la evaporación.

En el caso de las variables adimensionales de interés, en la Tabla 5-10 se muestra que tampoco existen diferencias importantes entre el perfil 2D y la extensión del modelo 3D, obteniendo los mismos resultados aunque existiendo un leve desplazamiento hacia el Borde Salmuera, como lo muestran los valores L_{D_s} y L_{D_i} , además de una disminución del flujo salino, como lo muestra el parámetro R_D .

Tabla 5-8: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión 3D - Permeabilidad

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Permeabilidad - Caso 5	96.5	110.0	5.0	320.6
Permeabilidad - Caso 5 - 3D	96.6	110.2	5.0	319.9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-9: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión 3D - Permeabilidad

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Permeabilidad - Caso 5	0.090	0.151	-0.004	-0.077	-0.160
Permeabilidad - Caso 5 - 3D	0.086	0.151	-0.005	-0.088	-0.144

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-10: Variables adimensionales de interés – Extensión 3D - Permeabilidad

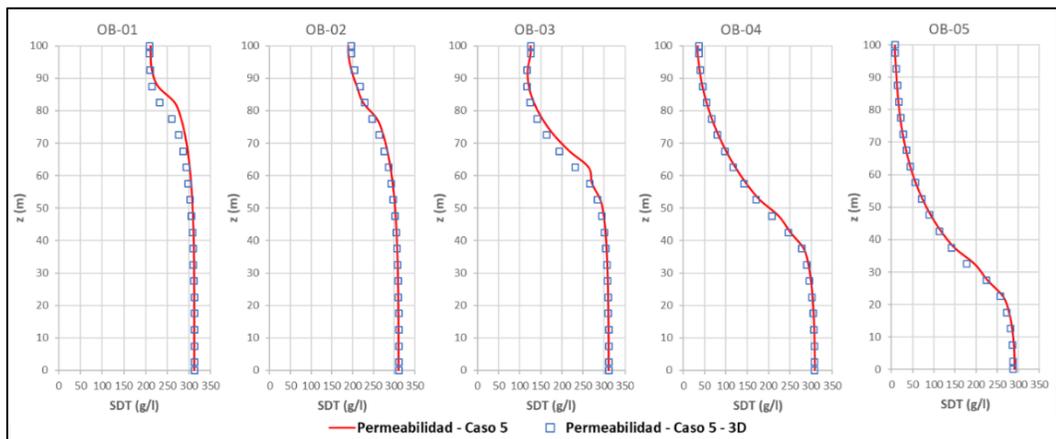
Modelo	Parámetro C_o	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Permeabilidad - Caso 5	138.4	0.004	0.409	0.000	0.216	0.595	-0.010
Permeabilidad - Caso 5 - 3D	138.8	0.004	0.405	0.000	0.232	0.570	-0.011

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-20 se muestran los perfiles de concentración en profundidad, donde las diferencias son leves con respecto al perfil 2D, existiendo un desplazamiento hacia el Borde Salmuera en algunos pozos, además de cambiar la distribución en profundidad en el pozo OB-01.

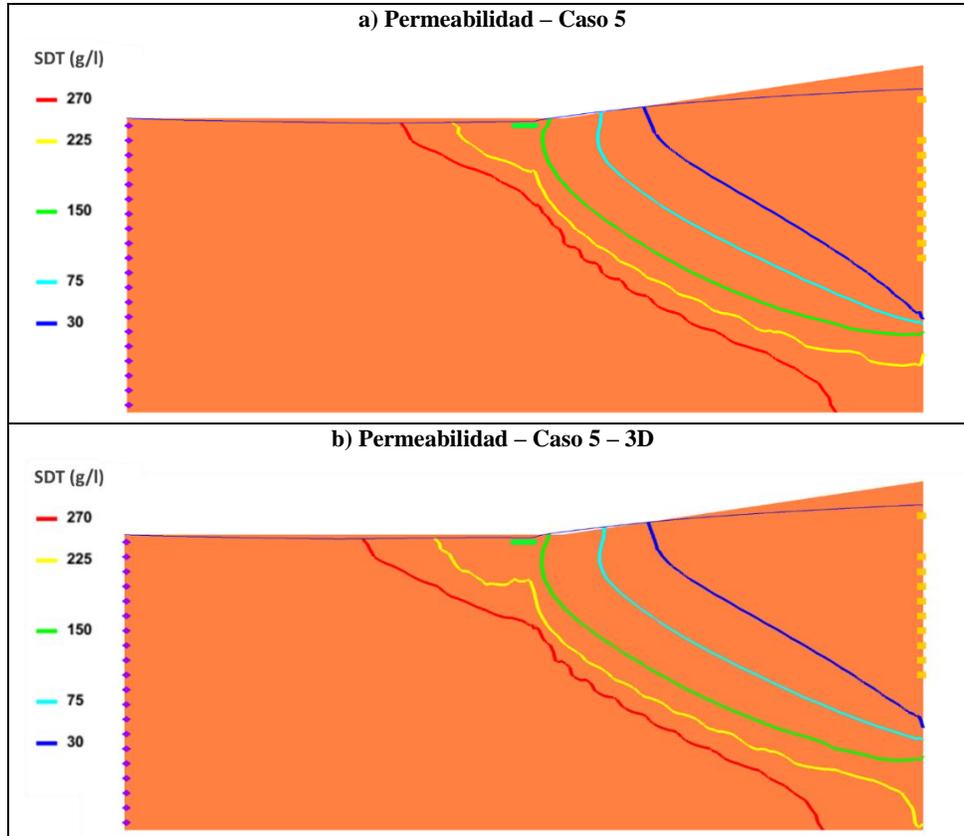
Con respecto a las isolíneas de concentración, en la Figura 5-21 se ve que la interfaz salina mantiene su forma general al extender a modelo 3D, existiendo diferencias en las líneas de concentraciones de 225 y 270 g/l en el Borde Salmuera y en superficie, lo cual se debe a la evapoconcentración producto del aumento de los niveles piezométricos en los costados de la zona de drenaje, además de un leve alzamiento en profundidad de la línea de concentración de 225 g/l debajo de los drenes.

Figura 5-20: Concentración de SDT (g/l) en profundidad – Extensión 3D - Permeabilidad



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-21: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión 3D - Permeabilidad



Fuente: Elaboración propia.

5.5.4. Flujo Borde Agua dulce – Caso 5 extendido a modelo 3D

Al comparar los resultados del perfil 2D con su respectiva extensión al modelo 3D para el Flujo Borde Agua Dulce – Caso 5, primero se tiene que los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT no sufren cambios significativos, tal como se muestra en la Tabla 5-11.

Lo mismo sucede con los flujos netos a través de las condiciones de borde, donde en la Tabla 5-12 se ve que aumentan levemente las salidas a través de las zonas de evaporación y disminuyen por la condición de dren, lo cual se debe a la configuración de ésta última, puesto que los niveles piezométricos aumentan en los bordes de la zona de drenaje, teniendo como salida del sistema la evaporación.

En el caso de las variables adimensionales de interés, en la Tabla 5-13 se muestra que tampoco existen diferencias importantes entre el perfil 2D y la extensión del modelo 3D, obteniendo los mismos resultados aunque existiendo un leve desplazamiento hacia el Borde Salmuera, como lo muestran los valores L_{D_s} y L_{D_i} , además de una disminución del flujo salino, como lo muestra el parámetro R_D .

Tabla 5-11: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión 3D – Flujo Borde Agua Dulce

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 5	95.8	114.3	4.8	325.3
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 5 – 3D	95.8	114.5	4.7	321.8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-12: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión 3D - Flujo Borde Agua Dulce

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 5	0.077	0.226	-0.003	-0.105	-0.195
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 5 – 3D	0.076	0.226	-0.005	-0.107	-0.190

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-13: Variables adimensionales de interés – Extensión 3D - Flujo Borde Agua Dulce

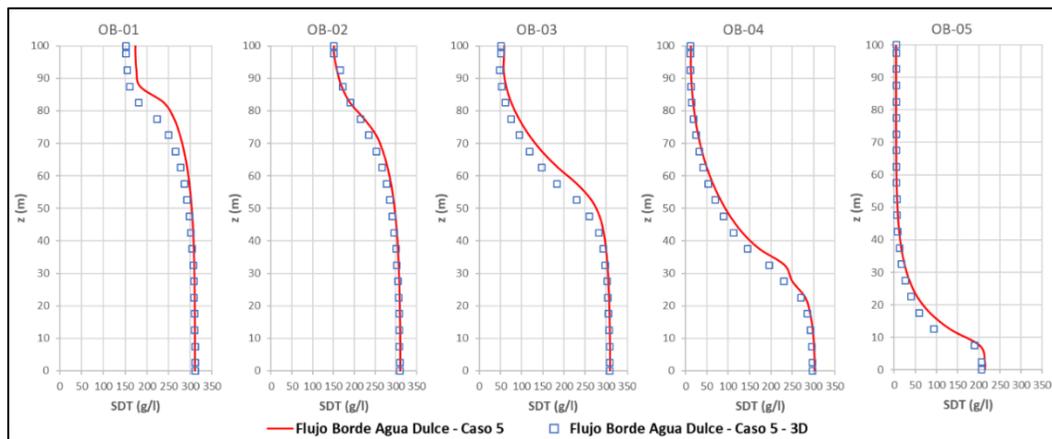
Modelo	Parámetro C_o	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 5	65.9	0.010	0.471	0.201	0.202	0.340	-0.022
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 5 – 3D	66.1	0.010	0.478	0.201	0.196	0.336	-0.021

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-22 se muestran los perfiles de concentración en profundidad, donde las diferencias son leves con respecto al perfil 2D, existiendo un desplazamiento hacia el Borde Salmuera en algunos pozos, además de cambiar la distribución en profundidad en el pozo OB-01.

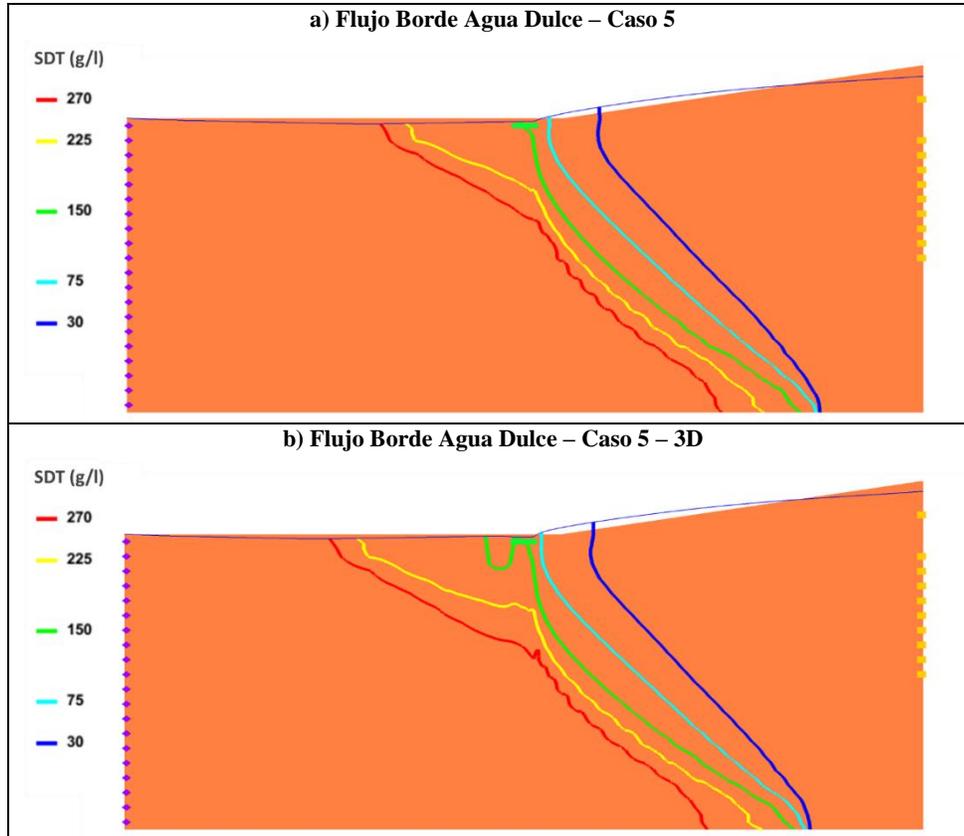
Con respecto a las isolíneas de concentración, en la Figura 5-23 se ve que la interfaz salina mantiene su forma general al extender a modelo 3D, existiendo diferencias en las líneas de concentraciones de 150, 225 y 270 g/l en el costado Borde Salmuera y en superficie, aumentando su extensión en dicho borde, lo cual se debe a la evapoconcentración producto del aumento de los niveles piezométricos en los costados de la zona de drenaje.

Figura 5-22: Concentración de SDT (g/l) en profundidad – Extensión 3D - Flujo Borde Agua Dulce



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-23: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión 3D - Flujo Borde Agua Dulce



Fuente: Elaboración propia.

5.5.5. Anisotropía Vertical – Caso 1 extendido a modelo 3D

Al comparar los resultados del perfil 2D con su respectiva extensión al modelo 3D para la Anisotropía Vertical – Caso 1, primero se tiene que los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT no sufren cambios significativos, tal como se muestra en la Tabla 5-14.

Lo mismo sucede con los flujos netos a través de las condiciones de borde, donde en la Tabla 5-15 se ve que aumentan levemente las salidas a través de las zonas de evaporación y disminuyen por la condición de dren, lo cual se debe a la configuración de ésta última, puesto que los niveles piezométricos aumentan en los bordes de la zona de drenaje, teniendo como salida del sistema la evaporación.

En el caso de las variables adimensionales de interés, en la Tabla 5-16 se muestra que tampoco existen diferencias importantes entre el perfil 2D y la extensión del modelo 3D, obteniendo los mismos resultados aunque existiendo un leve desplazamiento hacia el Borde Salmuera, como lo muestran los valores L_{D_s} y L_{D_i} , además de una disminución del flujo salino, como lo muestra el parámetro R_D .

Tabla 5-14: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión 3D – Anisotropía Vertical

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Anisotropía Vertical - Caso 1	96.3	111.8	5.0	320.6
Anisotropía Vertical - Caso 1 - 3D	96.4	112.0	5.0	322.6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-15: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión 3D - Anisotropía Vertical

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Anisotropía Vertical - Caso 1	0.063	0.151	-0.003	-0.099	-0.112
Anisotropía Vertical - Caso 1 - 3D	0.061	0.151	-0.004	-0.106	-0.102

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-16: Variables adimensionales de interés – Extensión 3D - Anisotropía Vertical

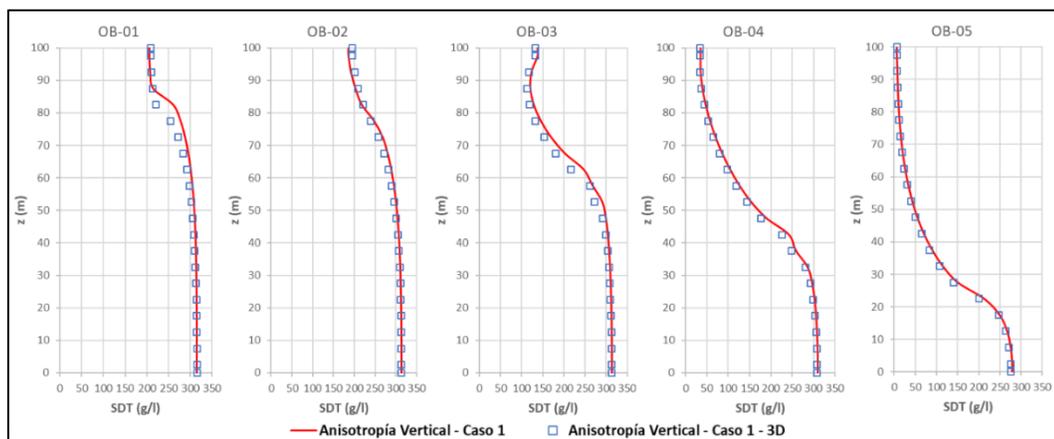
Modelo	Parámetro C_o	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Anisotropía Vertical - Caso 1	95.1	0.007	0.410	0.083	0.215	0.419	-0.016
Anisotropía Vertical - Caso 1 - 3D	95.3	0.007	0.412	0.088	0.217	0.403	-0.015

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-24 se muestran los perfiles de concentración en profundidad, donde las diferencias son leves con respecto al perfil 2D, existiendo un desplazamiento hacia el Borde Salmuera en algunos pozos, además de cambiar la distribución en profundidad en el pozo OB-01.

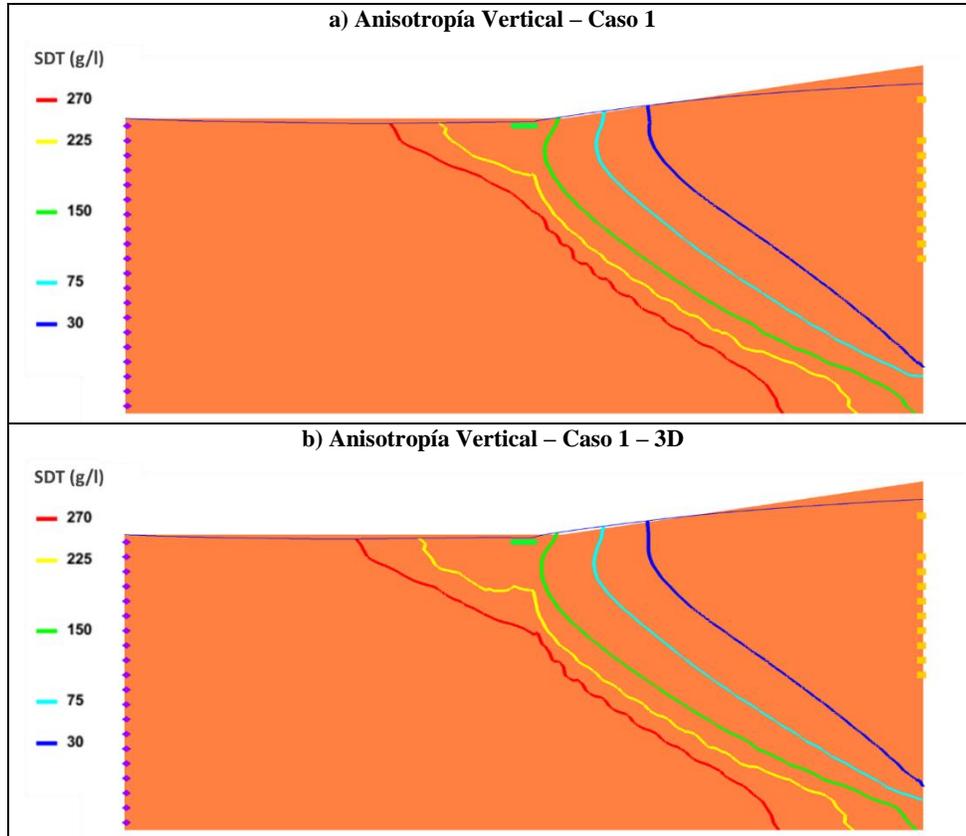
Con respecto a las isolíneas de concentración, en la Figura 5-25 se ve que la interfaz salina mantiene su forma general al extender a modelo 3D, existiendo diferencias en las líneas de concentraciones de 225 y 270 g/l en el costado Borde Salmuera y en superficie, lo cual se debe a la evapoconcentración producto del aumento de los niveles piezométricos en los costados de la zona de drenaje.

Figura 5-24: Concentración de SDT (g/l) en profundidad – Extensión 3D - Anisotropía Vertical



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-25: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión 3D - Anisotropía Vertical



Fuente: Elaboración propia.

5.6. Resultados del análisis de sensibilidad y estudio de la interfaz salina

Dentro de los resultados y análisis presentados en el Anexo B, primero se tiene que parámetros como la porosidad y la anisotropía no tienen efecto sobre la distribución de la concentración de SDT ni en los flujos, además de no mostrar cambios en los parámetros adimensionales considerados.

Por otro lado, se tiene que flujo de agua dulce y la conductividad hidráulica controlan de manera similar el desarrollo de la interfaz salina, generando una especie de compresión de esta debido a la diferencia de energías que se generan en ambas condiciones de borde producto del aumento en los niveles en el lado de agua dulce. Además, se modifica la pendiente de la interfaz salina, pivoteando con respecto al centro de la zona de mezcla.

En cambio, y al analizar la dispersividad, se tiene que la dispersión vertical afecta de manera importante la interfaz salina, donde a pesar de que los niveles piezométricos que alcanzan los distintos casos evaluados son similares, existen variaciones importantes en la interfaz salina, lo cual es consistente con estudios anteriores (Abarca et al., 2005), donde se concluye que el espesor de la zona de mezcla depende de la dispersividad.

En el caso de parámetros adimensionales analizados, lo cual se especifica en la Sección 5.4, se tiene que al comparar la pendiente m_s con el parámetro Co como se muestra en la Figura 5-6, se ve que existe una tendencia creciente entre ellas, donde para el caso de las dispersividades el efecto sobre la pendiente no está relacionado directamente con el parámetro Co sino que íntegramente por el valor que adquiere la dispersión. Con respecto a las otras variables es complejo identificar una tendencia clara, y en parte debido a cómo afectan cada uno de los parámetros evaluados a las variables adimensionales, donde algunas controlan íntegramente la distribución de concentración, como lo es la dispersión, mientras que otras influyen más en los niveles lo cual se traduce en cambios en la interfaz salina. Además, algunos casos no son comparables debido a cambios en la configuración del programa, como fue el evaluar la pendiente de la relación entre densidad y concentración, o la concentración impuesta en el borde de salmuera.

Al extender los análisis del perfil en dos dimensiones a un modelo de tres dimensiones, se tiene que se logran replicar los resultados de los casos evaluados, con lo cual los análisis realizados podrían ser extrapolables a un modelo de mayores dimensiones. Además, se verifica la factibilidad de construir un modelo en tres dimensiones considerando flujo con densidad variable, permitiendo aplicar los resultados obtenidos en el caso estudio, ayudando en la construcción de este.

6. APLICACIÓN DE RESULTADOS AL CASO ESTUDIO: SECTOR SUR DEL SALAR DE ATACAMA

6.1. Aspectos generales

Para construir el modelo numérico correspondiente al caso estudio, primeramente se desarrollará la metodología a seguir, donde se aplicarán los resultados obtenidos en los capítulos anteriores.

Luego, se recopilarán antecedentes de la zona de estudio en base a la información disponible, elaborando un modelo conceptual que dé cuenta del funcionamiento hidrogeológico del sistema con densidad variable.

Posteriormente, se construirá un modelo numérico considerando flujo con densidad variable y todo lo que ello implica. Se considerará el código SEAWAT y una geometría en tres dimensiones.

Finalmente, se realizará un análisis de la interfaz salina usando los parámetros adimensionales de interés definidos con anterioridad, con el fin de corroborar y comparar los resultados para el comportamiento de la interfaz salina.

6.2. Metodología para la modelación del caso estudio

Para elaborar el modelo en la zona estudio, primero se recopila toda la información disponible, siendo el primer tópico la geología del lugar, en donde es importante definir las sales presentes, asociadas a propiedades particulares cada una ellas, y realizar la respectiva caracterización hidrogeológica. Además, se determinan los límites del basamento y la ubicación de las zonas con baja permeabilidad, los cuales limitan el modelo.

También se busca información relacionada a la hidrología y la calidad de las aguas, siendo relevante la información de la evaporación y la ubicación de las lagunas, dado que son las principales salidas de agua subterránea, como también la estimación del flujo subterráneo de recarga, siendo la principal forzante hidráulica del sistema.

Con respecto a la hidroquímica de las aguas, es de interés la relación entre el soluto o variable estudiada con la densidad, puesto que una de las entradas importantes del modelo, y como se vio en el Capítulo 4, corresponde a la relación densidad/concentración. Por otro lado, destaca la elección de la variable analizada y el tipo de relación que tiene con la densidad, esperando que sea lineal dentro de los rangos de concentración observados en la zona de estudio.

También, es fundamental conocer la distribución en profundidad de la variable utilizada para relacionar con la densidad, debido a que la ubicación de la interfaz salina condiciona la dinámica del flujo dado su rol de cuña, siendo un elemento importante a representar y estando controlada por los parámetros analizados en el Capítulo 5.

Además, es necesario clasificar la zona de mezcla según la concentración y conocer su ubicación en superficie, la cual también debe ser representada, estando controlada principalmente por parámetros relacionados al flujo, como lo sería la conductividad hidráulica y el flujo subterráneo.

Por otro lado, y en paralelo con la calibración de las variables relacionadas con el proceso de transporte, es necesario representar los niveles piezométricos con pozos de observación disponibles en la zona. Aunque se debe tener especial cuidado con la información utilizada y la comparación con los niveles calculados, dado que los resultados obtenidos corresponden a un proceso de equivalencia de agua dulce, siendo importante el efecto en las zonas con elevadas concentraciones. Para ello, en el trabajo de Post et al. (2007) se hace un análisis sobre el correcto uso de mediciones de niveles piezométricos en aguas con densidad variable.

Con esto, se procede a la construcción del modelo numérico, definiendo extensión de éste, profundidad, tamaño de grilla, discretización vertical e implementación de las condiciones de borde basándose en las recomendaciones definidas en el Capítulo 4.

Posterior a esto se realiza el proceso de calibración, siendo el principal foco la distribución de la concentración del soluto analizado, además de corroborar los niveles y direcciones de flujo, las cuales deben coincidir con la dinámica particular de los sistemas con densidad variable.

Finalmente, y para realizar evaluaciones con el modelo sobre la evolución de la interfaz salina, se calculan los parámetros adimensionales analizados en este trabajo, los cuales resultan útiles al momento de comparar resultados.

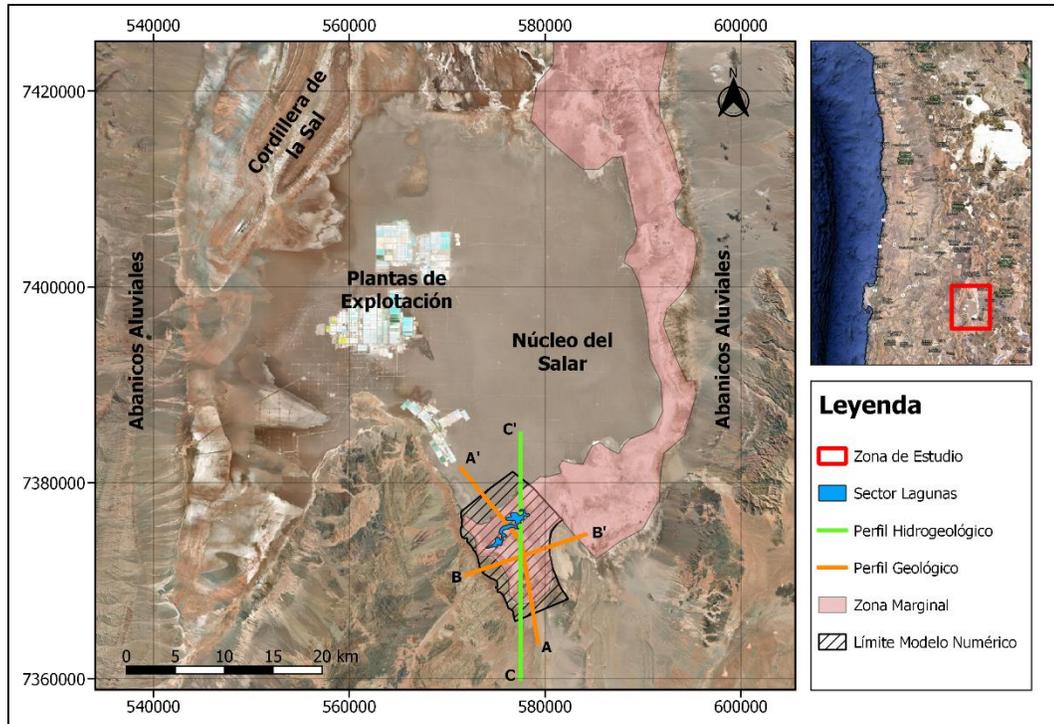
6.3. Antecedentes del caso estudio

6.3.1. Antecedentes generales

La cuenca del Salar de Atacama corresponde a una cuenca hidrográfica endorreica ubicada en la Región de Antofagasta, Chile, limitada en el oeste por la Cordillera de la Sal, en el este por la Cordillera de los Andes, en el norte por la convergencia entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de los Andes, mientras que en el sur por las montañas Lila. Dentro de dicha cuenca se pueden definir cuatro grandes dominios dados por: (1) Núcleo, correspondiente a los depósitos salinos y en donde se ubican las explotaciones de salmuera; (2) Zona Marginal, donde se encuentra la interfaz salina en superficie y los afloramientos que generan sistemas lagunares, dados por Soncor, Aguas de Quelana, Peine, y Tilopozo; (3) Abanicos aluviales, correspondiente a la zona de escorrentía superficial e infiltración ubicada entre el basamento y la zona marginal; (4) Basamento y depósitos volcánicos, correspondiente al rango montañoso de la cuenca donde se produce la precipitación (Marazuela et al, 2018).

En el Sector sur de Salar de Atacama se ubican los callejones de Tilopozo, Tilomonte, Lomas de Tilocalar, Cordón de Lila, y los acuíferos de Monturaqui y Negrillar. En particular, se representará con un modelo numérico el sector del callejón de Tilopozo, el cual contiene el sistema lagunar de La Punta – La Brava, tal como se muestra en la Figura 6-1, estableciéndose los límites de la zona de estudio.

Figura 6-1: Ubicación de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

6.3.2. Geología

En el caso de la caracterización geológica de la zona de estudio, se tiene que las unidades presentes en el sector sur del Salar de Atacama, tal como se muestra en la Figura 6-2, y las presentes en la interpretación geológica en profundidad, dado por los perfiles mostrados en la Figura 6-3, están dadas por (Golder, 2018):

- **Estratos de Tilocalar (OMet):** Corresponde a una secuencia continental compuesta por intercalaciones entre gravas areno-limosas y arenas gravo-limosas, con un grado de compactación variable, siendo una unidad subyacente discordantemente a la Ignimbrita Tucúcaro. Se ha detectado un horizonte de 50 m aproximadamente en donde los depósitos se presentan cementados (mayormente por carbonatos) en la zona donde el techo de la unidad se encuentra bajo la Ignimbrita Tucúcaro. Adicionalmente, se han identificado niveles de alta compactación, en especial en los depósitos ubicados a 400 m bajo el nivel del terreno.

- **Ignimbrita Tucúcaro (Pit):** En general, la Ignimbrita Tucúcaro se describe como una toba moderadamente soldada, de color pardo claro a blanquizo, con fenocristales de plagioclasas y biotita orientada, además de fragmentos de pómez achatados y escasos fragmentos líticos. Aflora extensamente en el Sector de Callejón formando el techo de los Estratos de Quebrada Salín y Estratos de Tilocalar. La potencia observada en sondajes promedia los 20 m de espesor. Su distribución superficial y subsuperficial está fuertemente asociada a la tectónica cuaternaria, formando parte de pliegues y escarpes.

- **Formación El Tambo (Plfet):** Depósitos de calizas de color blanco a gris claro que se distribuyen al sureste del Salar de Atacama. Afloran al este de Peine y de Tilomonte, sobre la Ignimbrita Parao, y al oeste de la vega Tilocalar, sobre la Ignimbrita Tucúcaro. Las calizas se presentan en capas bien

estratificadas, duras, en partes compactas y en otras cristalizadas en fibras perpendiculares a la estratificación. Contienen intercalaciones de sedimentitas clásticas.

- **Depósitos de gravas modernas (Plgm):** Esta unidad incluye depósitos de gravas polimícticas matriz-soportadas, mal seleccionadas, que constituyen el relleno inactivo de las quebradas actuales y conforman los conos aluviales a la salida de las quebradas que desembocan en el Salar de Atacama. En la Quebrada del Tucúcaro estos depósitos sobreyacen a la Ignimbrita Tucúcaro, donde alcanzan 10 m de espesor. La superficie actual de los conos aluviales se encuentra cubierta de bolones en los cuales están representadas las litologías de los cerros circundantes.

- **Costra o Núcleo de Halita (Plhs-5):** La parte central del salar está formada por un núcleo homogéneo de costras salinas de cloruros, de origen evaporítico, con depósitos compactos, rugosos y fracturados que albergan el acuífero de salmuera, y que especialmente en su parte suroeste, presentan zonas de mezclas de sales y aportes sedimentarios laterales. El núcleo es un cuerpo homogéneo formado mayoritariamente por depósitos de halita cristalina (NaCl) prácticamente pura, de origen evaporítico, que contiene intercalaciones de arcillas, limos y materiales vulcano-sedimentario. En esta unidad se distingue una parte superior de mayor porosidad y conductividad hidráulica, de espesor variable (entre 30 y 60 m) y una sección inferior más compacta debido a la precipitación de sales y al efecto de la presión litostática.

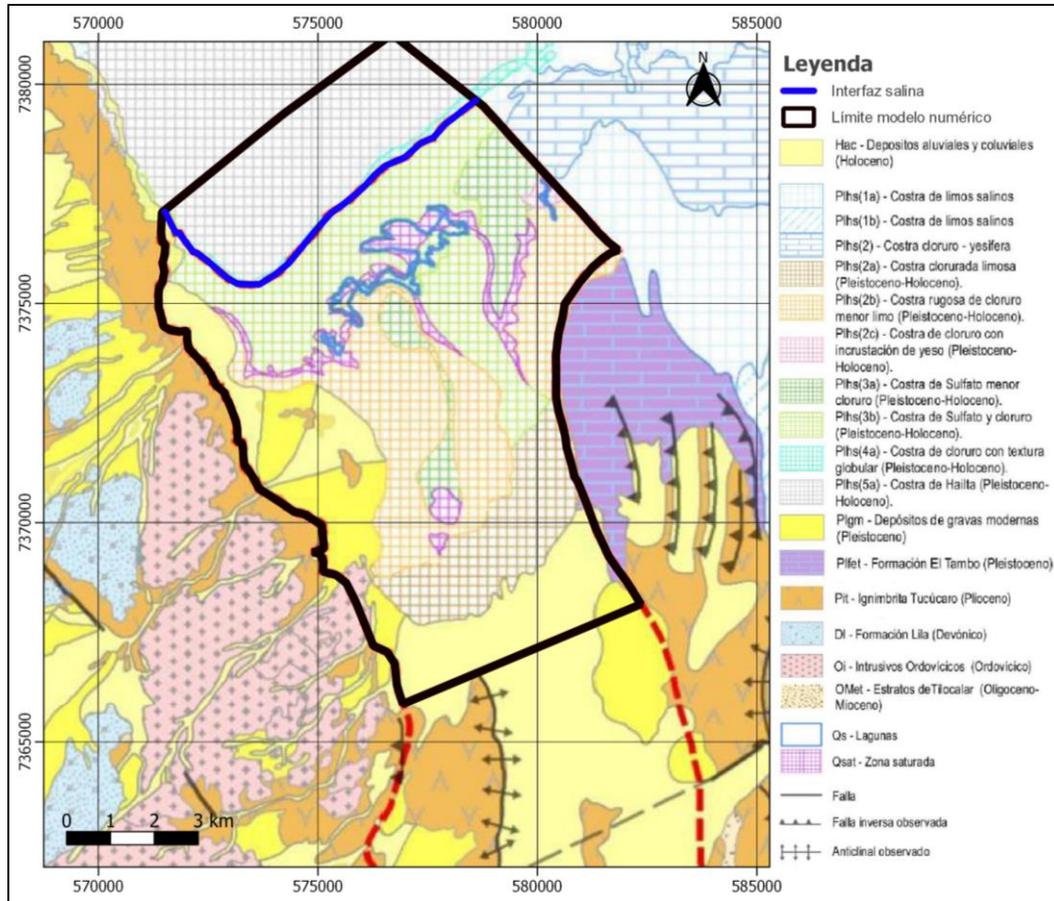
- **Costra de halita y yeso, o Sulfato Granular (Plhs-3):** Se presenta entre la zona de lagunas de Tilopozo y el núcleo de halita. En superficie corresponde a una costra compacta y rugosa compuesta por finos granos de sulfatos y cristales de halita. Bajo esta, se presenta como una costra de sulfatos no consolidada, compuesta principalmente por yeso granular tamaño arena y grava fina. Se estima una potencia entre 50 y 100 cm.

- **Costra salina suave, o Estratificación Salina (Plhs-2):** Se presenta en el sector central de Tilopozo. Se caracteriza por una costra superficial compacta de baja rugosidad, compuesta principalmente por cristales de sulfatos y menor cloruro. Bajo esta costra, es posible encontrar una delgada capa de yeso granular (< 20 cm) con limos carbonatados húmedos a saturados. El nivel freático se encuentra generalmente acompañado de una costra carbonatada compacta y dura (< 5 cm). Por debajo del nivel, se presenta la secuencia de fango salino con intercalaciones de costras carbonatadas.

- **Costra salina suave, o Limos Salinos (Plhs-1):** Se presenta hacia el margen sur de Tilopozo y corresponde al engrane lateral entre los depósitos netamente salinos y los depósitos clásticos. Se caracteriza por una superficie de baja rugosidad, puede presentar vegetación tipo breas y grama salina. Está compuesta principalmente por limos y arcillas terrígenas, que presentan cloruros depositados en sus cavidades (desde pequeños cristales a lentes salinos de hasta de 10 cm de espesor). Se estima una potencia de 10 m. El nivel freático puede encontrarse bajo los 2 metros de profundidad.

- **Depósitos aluviales y coluviales (Hac):** Depósitos aluviales y coluviales que cubren los flancos de los relieves principales. Están formados por bloques de diverso tamaño cuya litología es local, dado que está en directa relación con los relieves de donde provienen. Son depósitos clasto soportados en que la matriz es escasa y de tamaño arena.

Figura 6-2: Caracterización geológica de la zona de estudio



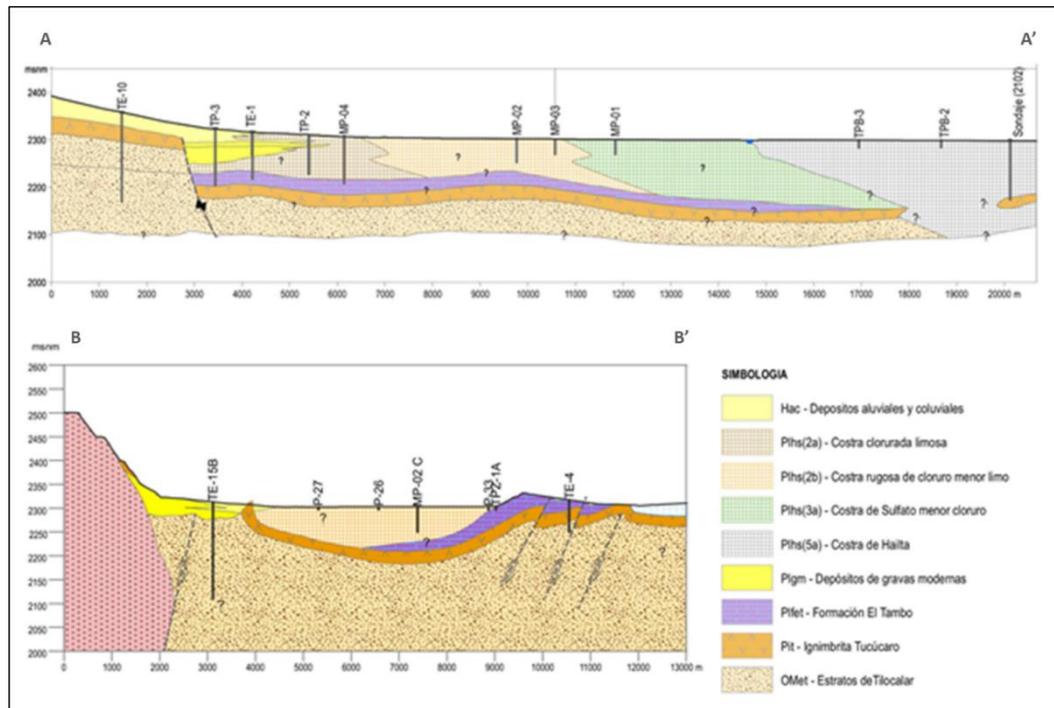
Fuente: Modificado de Golder (2018).

Con respecto a los perfiles, primero se tiene que el perfil A-A' representa una sección longitudinal que se adentra hacia el núcleo del Salar de Atacama desde el sector Tilopozo, donde el segmento sur corresponde a la fase terminal de los depósitos clásticos y volcánicos característicos del sector Callejón, conformados por depósitos aluviales y coluviales apoyados sobre la Ignimbrita Tucúcaro y los sedimentos que conforman a los Estratos de Tilocalar. La sección central, que corresponde al sector Tilopozo, básicamente presenta intercalaciones de costras evaporíticas sulfatadas y carbonatadas, donde solo en los primeros centímetros superficiales (hasta 30 cm) existe presencia de minerales clorurados. El segmento norte corresponde básicamente al núcleo de halita del Salar de Atacama.

En el caso del perfil B-B', se tiene que éste representa una sección transversal del sector de Tilopozo, teniendo una dirección este-noreste, comenzando sobre el abanico aluvial de la Quebrada Tucúcaro, atravesando los depósitos salinos de Tilopozo y anclándose en la Península de Tilocalar. El segmento oeste presenta un gran cuerpo intrusivo paleozoico en contacto lateral con los depósitos cenozoicos del sector, conformados por: Estratos de Tilocalar, Ignimbrita Tucúcaro, Gravas Modernas y los Depósitos Aluviales del Holoceno. Esta situación solo es posible debido al importante alzamiento que sufrió el cuerpo intrusivo impulsado por efectos estructurales mayores. La sección central presenta los depósitos evaporíticos de Tilopozo apoyados sobre una "hoja ignimbrítica" semicontinua y probablemente sobre depósitos de calizas de la Formación Tambo. Se ha interpretado que los depósitos de caliza, que afloran en la península de Tilocalar, deberían acuñarse hacia el centro de Tilopozo, dado que no existen registros de esta unidad hacia el sector

oeste (Cerro Lila). Sobre la Península de Tilocalar (y las de Tilocalar al sur) es posible reconocer una serie de fallas inversas, que en algunos casos han cortado toda la secuencia cenozoica (con desplazamientos de hasta 10 m) y en otros han generado pliegues por propagación de fallas.

Figura 6-3: Perfiles geológicos en la zona de estudio



Fuente: Golder (2018).

6.3.3. Hidrología

Debido a que la Cordillera de los Andes actúa como barrera atmosférica, el Salar de Atacama está caracterizado por un clima árido con bajas tasas de precipitaciones, siendo estas menores a 20 mm/año en el núcleo. Mientras que la mayor fuente del agua subterránea proviene de las precipitaciones en la Cordillera de los Andes, alcanzando un promedio de 160 mm/año (Marazuela et al, 2018)

Con respecto a la hidrografía del Salar de Atacama, se tiene que los ríos contribuyentes a éste corresponden al río San Pedro, que tiene un flujo promedio de 1 m³/s y con eventos que llegar a 25 m³/s, y el río Vilama, teniendo un flujo promedio de 0.2 m³/s. Ambos ríos fluyen desde el norte al sur, terminando el río San Pedro en un delta con el mismo nombre. Por otro lado, existen escorrentías intermitentes que descienden desde las montañas en el lado este, las cuales infiltran en la extensión de los abanicos aluviales.

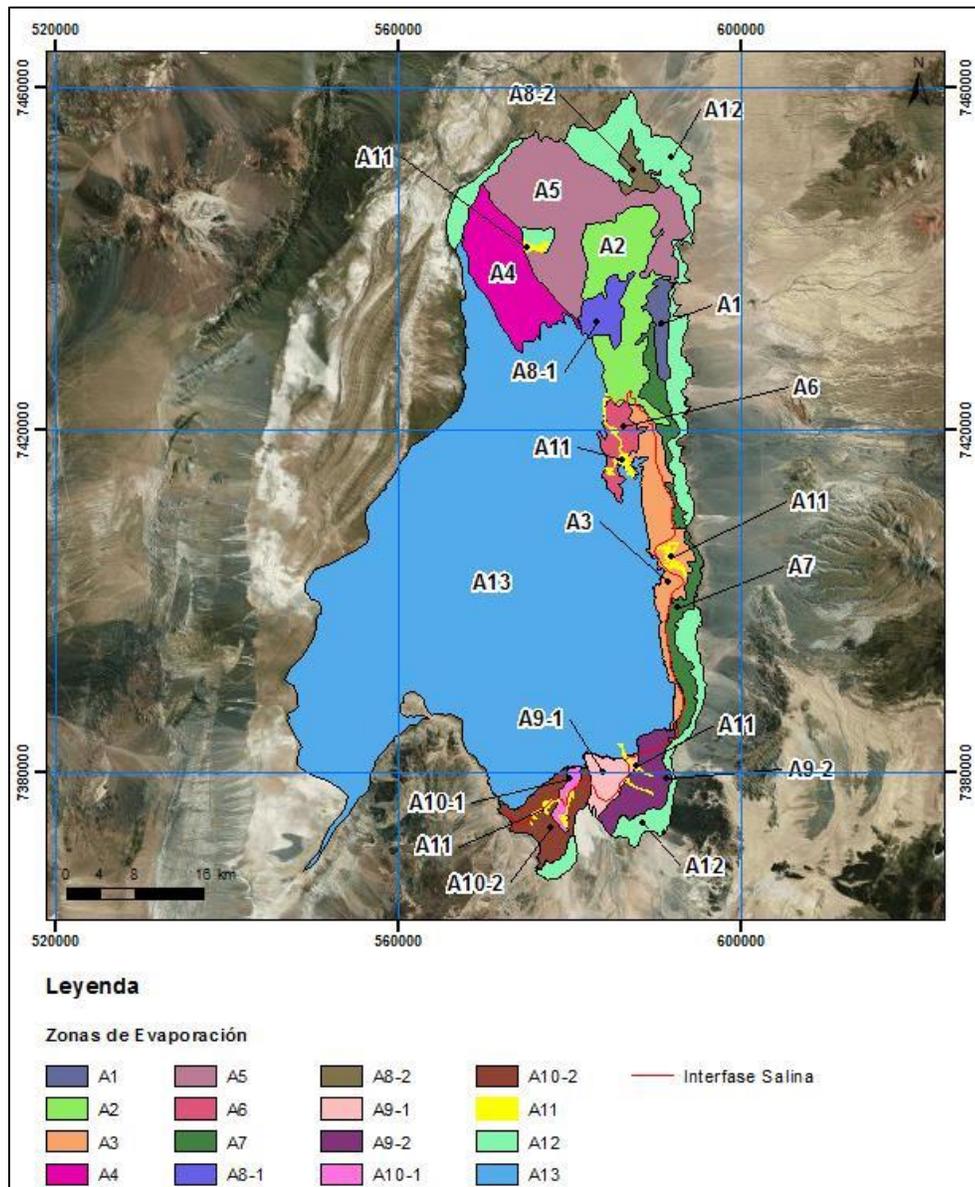
En el caso de los cuerpos superficiales de agua, estos se ubican en el margen este del salar, en particular en la zona marginal, los cuales son ambientes con un valor significativo para la humanidad (Marazuela et al, 2018), siendo hábitat de especies endémicas destacando los flamencos, los cuales se alimentan de microcrustáceos que dependen de la alta salinidad del salar.

Las lagunas se encuentran agrupadas en cuatro sistemas: (1) Soncor, conteniendo las lagunas de Chaxa, Barros Negros, y Puilar, las cuales se encuentran conectadas mediante el canal Burro Muerto; (2) Aguas de Quelana; (3) Peine, que contiene las lagunas Salada, Saladita e Interna; (4) Tilopoza, conteniendo las lagunas de La Punta y La Brava.

La principal salida de agua en estos sistemas corresponde a la evaporación, la cual ocurre principalmente en el núcleo y en la zona marginal, donde la tasa depende de la composición del suelo, la salinidad, y la profundidad a la cual se ubica el nivel piezométrico.

En el trabajo de SGA (2015) se realiza una actualización en la estimación de la evaporación en el Salar de Atacama en base a nueva información obtenida en campañas de terreno, donde se comparan los resultados con el trabajo de Mardones (1997), siendo este último el principal referente de las zonas y los flujos de descarga por evaporación en el Salar de Atacama. En la Figura 6-4 se muestran las zonas de evaporación, mientras que en la Tabla 6-1 se muestran las de evaporación para cada una de las zonas.

Figura 6-4: Zonas de evaporación identificadas en el Salar de Atacama



Fuente: SGA (2015).

Tabla 6-1: Tasa de evaporación (mm/d) para cada zona

Zona Mardones	Agua Salobre		Intermedia		Total	
	Superficie (km ²)	Tasa (mm/d)	Superficie (km ²)	Tasa (mm/d)	Superficie (km ²)	Tasa (mm/d)
A1	21.5	0.265	-	-	21.5	0.265
A2	128.0	0.047	1.7	0.036	129.7	0.046
A3	25.1	0.064	62.7	0.047	87.8	0.052
A4	109.0	0.637	-	-	108.9	0.636
A5	210.0	0.257	-	-	210.0	0.257
A6	-	-	30.2	0.01	30.2	0.01
A7	63.3	0.676	1.3	0.651	64.5	0.676
A8-1	28.1	0.029	-	-	28.1	0.029
A8-2	15.7	1.042	-	-	15.7	1.042
A9-1	7.2	0.642	19.1	0.209	26.3	0.328
A9-2	40.8	0.110	8.3	0.229	49.0	0.13
A10-1	4.6	0.846	5.7	0.175	10.3	0.476
A10-2	33.0	0.999	18.0	0.236	51.0	0.73
A11	-	-	-	-	9.4	6.5
A12	216.9	0.310	-	-	216.9	0.31
A13	-	-	-	-	1655.0	0.058

Fuente: SGA (2015).

6.3.4. Hidroquímica

Con respecto a la calidad de agua en la zona de estudio, primero se tiene que en base al trabajo de Golder (2018) en la Tabla 6-2 se muestran los valores de diversas muestras de agua, existiendo una transición espacial de las concentraciones de SDT. En el callejón sector sur se registran aguas dulces con una concentración promedio de 1.7 g/l con rangos entre 1.5 y 2.1 g/l. En el sector norte de Callejón se alcanzan valores más elevados que los del sector sur de Callejón, con una concentración promedio de 27 g/l con rangos entre 2 y 300 g/l, donde el valor máximo está asociado a muestras tomadas en profundidades bajo la interfaz salina y corresponde por tanto a aguas del tipo salmuera. En el sector de Tilopozo se tienen concentraciones mayores que el norte de Callejón, llegando a 60.0 g/l con mínimos de 2.0 g/l y máximos de 400.0 g/l, donde nuevamente el valor máximo corresponde a una muestra de salmuera tomada bajo la interfaz salina. En el sector Salar se observan las concentraciones más altas, con un promedio de 325.0 g/l, mínimos sobre 240.0 g/l y máximos del orden de 400.0 g/l, dando cuenta que en este sector las aguas son del tipo salmuera. En el caso de la conductividad eléctrica CE, ésta mantiene el comportamiento de los SDT (Golder, 2018).

Cabe destacar que a partir de la clasificación de las aguas de Fetter (2001), se tiene que las aguas de recarga provenientes del sector Callejón corresponde a aguas salobres, superando levemente el límite superior de concentración de SDT de la clasificación de aguas dulces. Pero para efectos prácticos, se asume que el flujo subterráneo proveniente de dicho sector corresponde a agua dulce.

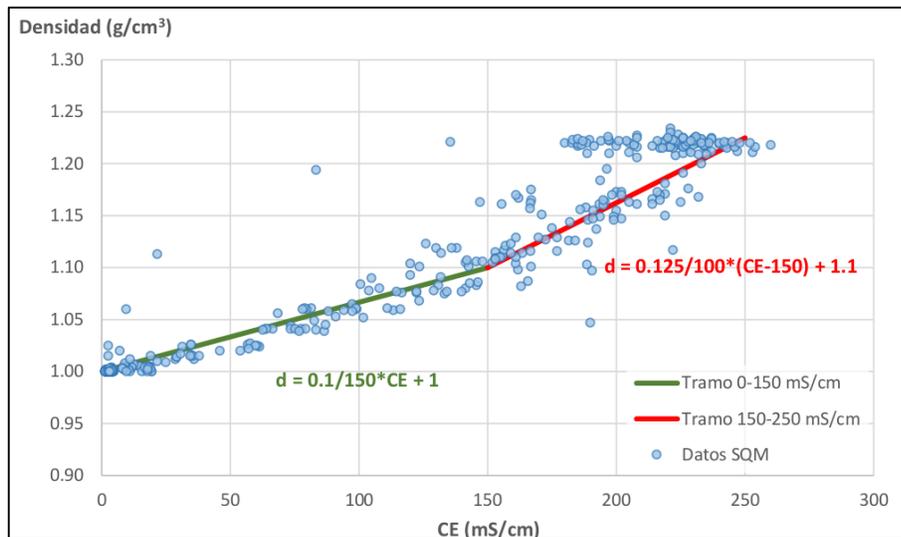
Tabla 6-2: Parámetros fisicoquímicos de las aguas en el sector de Callejón, Tilopozo y Salar

Parámetro	Variable	Sector Callejón		Sector Tilopozo	Sector Salar
		Sur	Norte		
SDT (g/l)	Cantidad de valores	26	45	336	151
	Promedio	1.7	27.2	62.0	324.3
	Mínimo	1.5	1.8	1.9	240.9
	Máximo	2.1	300.2	401.4	411.2
CE (μS/cm)	Cantidad de valores	24	42	314	99
	Promedio	2,375	32,274	58,711	239,789
	Mínimo	867	1,490	2,300	184,000
	Máximo	3,138	473,000	277,300	306,000

Fuente: Golder (2018).

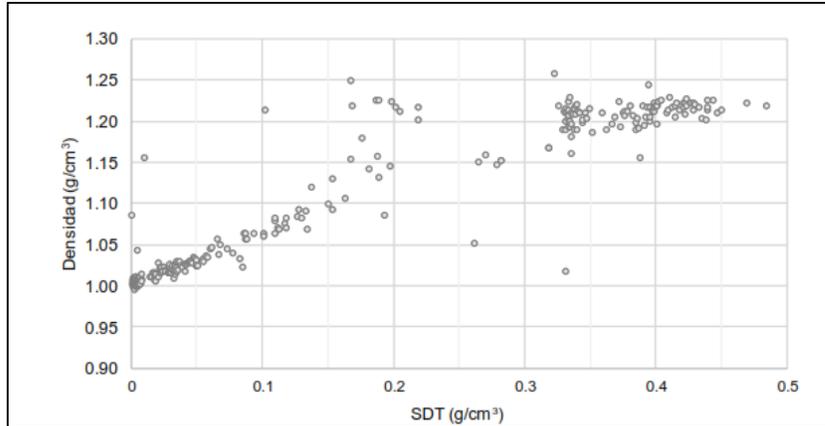
En el caso de la relación entre los parámetros fisicoquímicos con la densidad, en la Figura 6-5 y Figura 6-6 se muestran los gráficos de la densidad con respecto a la conductividad eléctrica y SDT respectivamente, donde se aprecia un punto de inflexión entre las aguas dulces y la salmuera. En el caso de la concentración de SDT, se ve que existe una tendencia creciente lineal hasta llegar a un valor aproximado de 300 g/l, a partir del cual la densidad se mantiene con un valor constante de 1.2 g/cm³.

Figura 6-5: Relación densidad-CE de las aguas en la zona de estudio



Fuente: Golder (2018).

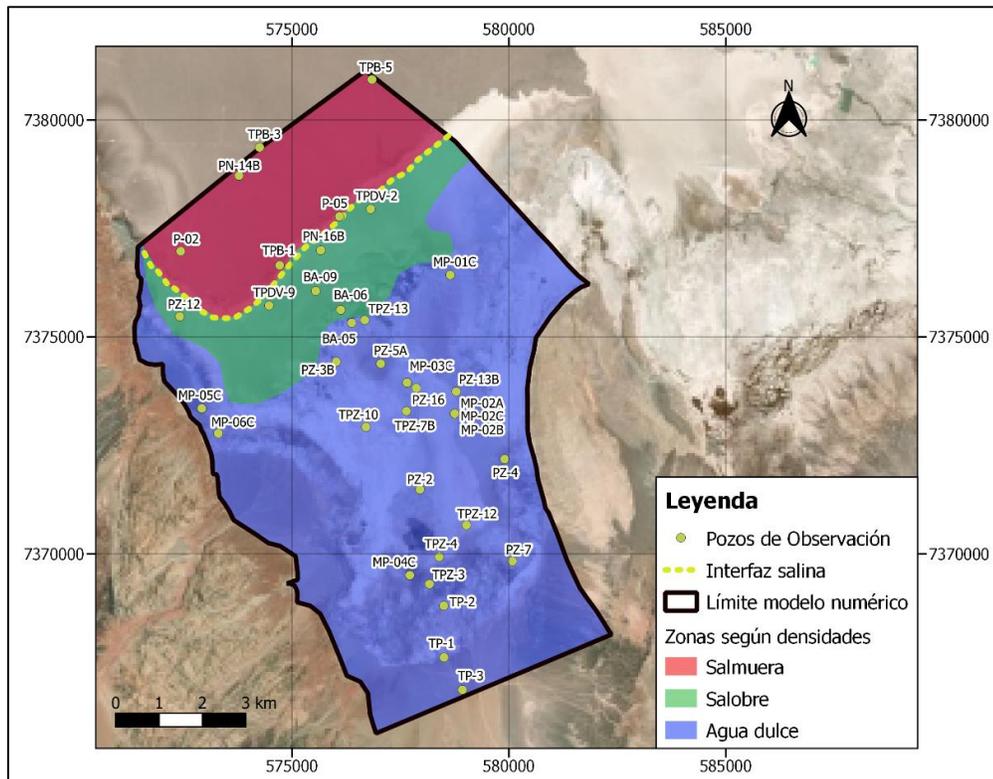
Figura 6-6: Relación densidad-SDT de las aguas en la zona de estudio



Fuente: Golder (2018).

Con respecto a la ubicación de la interfaz salina en superficie, se considera el criterio usado en Golder (2018), donde se define una primera zona correspondiente a agua dulce, la cual abarca desde el sector de Callejón hasta las lagunas de La Punta y La Brava, con densidades cercanas a 1 g/cm^3 . Una segunda zona de aguas del tipo salobre se ubica entre la zona de las lagunas hasta el canal de disolución, con densidades entre los 1.04 y 1.08 g/cm^3 . Finalmente, una tercera zona de aguas del tipo salmuera se ubica al norte del canal de disolución, abarcando el núcleo del Salar, con densidades en torno a los 1.2 g/cm^3 . En la Figura 6-7 se muestra la ubicación de cada zona, además de la definición de la interfaz salina en superficie, dada por el límite entre la zona de agua salobre y salmuera, junto con los pozos de información disponibles.

Figura 6-7: Ubicación interfaz salina en superficie y pozos de observación



Fuente: Elaboración propia.

6.3.5. Hidrogeología

Primeramente, y considerando el trabajo de SGA (2015), se definen las siguientes unidades hidrogeológicas en el sector Sur del Salar de Atacama, donde en la Figura 6-8 se muestra un perfil que atraviesa la zona de estudio:

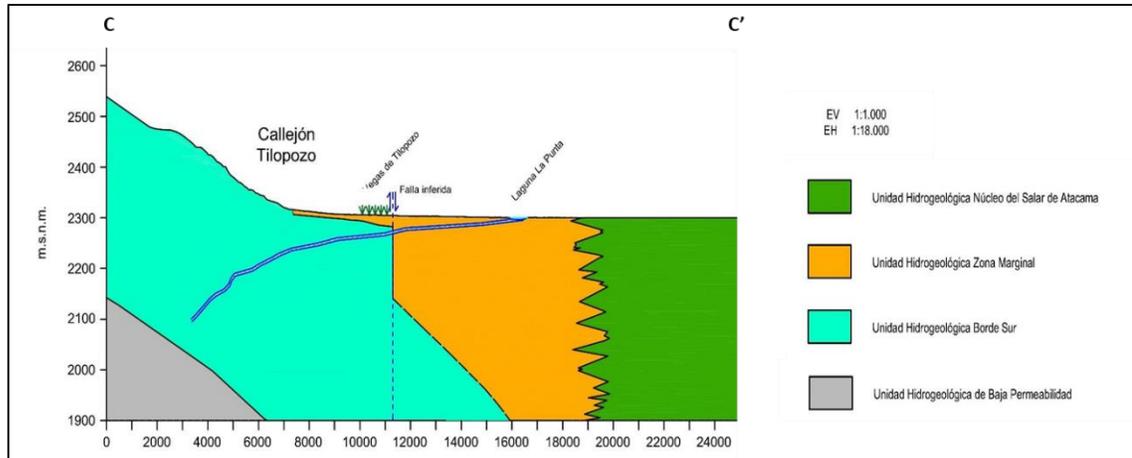
- **UH Núcleo del Salar:** Correspondiente a la unidad geológica de Costra o Núcleo de Halita (Plhs-5). Esta unidad es un cuerpo homogéneo formado mayoritariamente por depósitos de halita cristalina (NaCl) prácticamente pura, de origen evaporítico, que contiene intercalaciones de arcillas, limos y materiales vulcano-sedimentarios. La superficie es muy irregular, dentada y quebradiza y presenta un color pardo. La halita presenta porosidad primaria (intercristalina) y porosidad secundaria en forma de fracturas y conductos de disolución. Se diferencia una parte superior del núcleo de mayor porosidad y espesor variable de entre 30 y 60 metros aproximadamente, con un promedio de 50 m. Los niveles de agua en el núcleo se encuentran muy próximos a la superficie, en condiciones naturales, la zona no saturada tiene un espesor inferior a 1 m. La zona saturada del núcleo presenta agua de tipo salmuera que presenta una gran concentración de sólidos disueltos. Así como se observa en el núcleo una parte superior de alta porosidad, también se distingue un tramo superior de elevada conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento y un tramo inferior más compacto debido a la precipitación de sales y al efecto de la presión litostática. El núcleo de halita del Salar se caracteriza por poseer una conductividad hidráulica con una elevada heterogeneidad, con valores que varían entre 10^{-2} y 10^3 m/día en los metros superiores, mientras que entre 10^{-3} y 10^0 m/d en pruebas realizadas por debajo de 50 m de profundidad. Los valores del coeficiente de almacenamiento son en general altos, siendo frecuentes valores de 0.1 (10%).

- **UH Zona Marginal:** Correspondiente a las unidades geológicas de Costra de halita y yeso, o Sulfato Granular (Plhs-3), Costra salina suave, o Estratificación Salina (Plhs-2) y Costra salina suave, o Limos Salinos (Plhs-1). Corresponde a una unidad hidrogeológica con materiales salinos, constituida por costras de transición a cloruros, costras yesíferas, costras cloruro yesíferas y costras de limos salinos, y se distribuye bordeando la unidad Núcleo de Halita del Salar de Atacama por su límite Sur y Este. A esta unidad se le asignan valores de conductividad hidráulica de 10^{-4} a 10^2 m/d, con valores del coeficiente de almacenamiento que están entre los 2×10^{-2} y 2×10^{-1} .

- **UH Borde Sur:** Correspondiente a las unidades geológicas de Estratos de Tilocalar (OMet), Ignimbrita Tucúcaro (Pit), Formación El Tambo (Plfet), Depósitos de gravas modernas (Plgm), y Depósitos aluviales y coluviales (Hac). Desde niveles más superficiales a más profundos se pueden diferenciar: depósitos aluviales someros, niveles ignimbríticos y materiales de la Formación Tambores que se sitúan en la parte inferior. Los depósitos aluviales someros principalmente están constituidos por rellenos aluviales y vulcano sedimentarios que se sitúan más superficialmente, la naturaleza de estos sedimentos es muy heterogénea, donde litológicamente consiste en una mezcla de gravas, arenas y limos sin consolidar. A esta unidad se le asignan valores de conductividad hidráulica de 10^0 a 10^1 m/d, con valores del coeficiente de almacenamiento que están entre los 3×10^{-2} y 1.4×10^{-1} .

- **UH Baja Permeabilidad:** Corresponde al conjunto de rocas con comportamiento casi impermeable que bordean la cuenca hidrogeológica del Salar de Atacama, y configuran el basamento de la misma.

Figura 6-8: Perfil hidrogeológico en la zona de estudio



Fuente: SGA (2015).

Con respecto al funcionamiento hidrogeológico del sector sur del Salar de Atacama, tal como se muestra en la Figura 6-9, se tiene que es un sistema en el cual interactúa un flujo subterráneo de agua dulce proveniente del acuífero con la salmuera presente en el núcleo del Salar, además de los afloramientos que generan los sistemas lagunares en la zona marginal.

La hidrodinámica del flujo subterráneo en Tilopozo puede ser descrita considerando que el agua dulce que fluye hacia el salar, asciende por sobre las aguas hipersalinas hasta aflorar en superficie en los sistemas de lagunas La Punta y La Brava y llegar al canal de disolución. La interacción entre estas aguas genera en profundidad el desarrollo de una interfaz salina, la cual se vuelve somera al acercarse al sector del canal de disolución. La dirección del flujo subterráneo en el sector de Tilopozo es de sur a norte, con un caudal que se ha estimado entre los 610 l/s y 640 l/s (SGA, 2015; Golder, 2018).

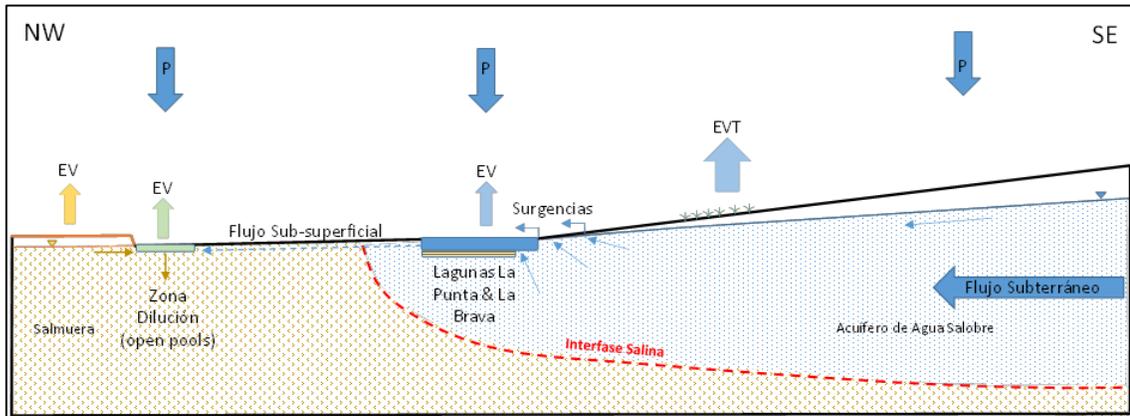
En el tránsito desde el sector sur hacia el norte, la calidad y densidad del agua proveniente del acuífero va cambiando identificándose tres zonas superficiales características. La primera zona corresponde a aguas del tipo dulce y se encuentra desde el sector de Callejón hasta las lagunas La Punta y La Brava. La segunda zona corresponde a aguas de tipo salobre y se encuentra desde las lagunas hasta el canal de disolución. La última zona corresponde a aguas de tipo salmuera y se encuentra al norte del canal de disolución. Esto indica que el canal de disolución coincide con el lugar donde la interfaz salina se manifiesta en superficie y marca el límite norte del acuífero MNT. Por otra parte, bajo la interfaz salina las aguas son del tipo salmuera con densidades del orden de 1.2 g/cm^3 .

En la zona de salmuera alojada en el sector sur del Salar de Atacama, los niveles freáticos en su condición natural varían en un rango de solo 30 cm, en torno a la cota 2,299.5 m.s.n.m., y según los registros históricos estos han descendido continuamente producto de las extracciones de salmuera, manteniendo dicho rango, con un aumento de las tasas de descenso a partir de 2012.

Con respecto a la configuración de los materiales, se tiene que la zona superficial está asociada a depósitos salinos y a la parte superior del núcleo del salar, con conductividades hidráulicas altas. Por otro lado, en la parte inferior las conductividades descienden debido a la disposición de las otras unidades hidrogeológicas, y a la compactación del núcleo de halita.

En el caso de la interfaz salina, y debido al tipo de interacción entre el agua dulce y la salmuera, se tiene que los procesos que dominan la dinámica de la interfaz salina corresponden a la advección y a la dispersión.

Figura 6-9: Funcionamiento hidrogeológico de la zona de estudio



Fuente: SGA (2015).

6.4. Construcción del modelo numérico

6.4.1. Domino y geometría del modelo

Con respecto a la construcción del modelo numérico, primero se tiene que los límites del dominio, tal como se muestra en la Figura 6-10, se definen según:

- **Límite norte:** Se definió 2 km al norte de canal de disolución, límite en donde se ubican los pozos PN-14B, TPB-3 y TPB-5, los cuales dan cuenta de la condición de borde de niveles constante en la salmuera.
- **Límite sur:** Se define entre el límite de los sectores de Tilopozo y Callejón determinados por Golder (2018), siendo una línea perpendicular a la dirección de flujo en dicho sector, además de ser el lugar en donde se ubica el pozo TP-3.
- **Límite inferior:** Se consideró una cota dada por 2,200 m, correspondiente a la profundidad a la cual se encuentran el límite entre el acuífero y los estratos menos permeables, según la información de los perfiles geológicos.
- **Límite superior:** Se consideran los modelos digitales de elevación ALOS-PALSAR, disponibles a través de Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE), los cuales poseen una resolución espacial de 12.5 m y se encuentran disponibles para cada región del país.

Con respecto a las dimensiones espaciales del modelo, primero se tiene que éste posee una extensión longitudinal de aproximadamente 13,500 m, abarcando una superficie de 86.4 km², con un espesor total que va desde los 99 m a los 134 m siendo mayor en el sector sur, con un espesor promedio de 107 m.

En el caso de la discretización horizontal, ésta se asumió igual a 250 m, mientras que para la discretización vertical ésta va desde los 4.9 m a 6.7 m con un promedio de 5.4 m, generando un total de 20 capas las que se distribuyen uniformemente en la dirección vertical según la topografía y la cota del límite inferior del modelo. Con esto, el total de celdas activas del modelo corresponden a 27,640.

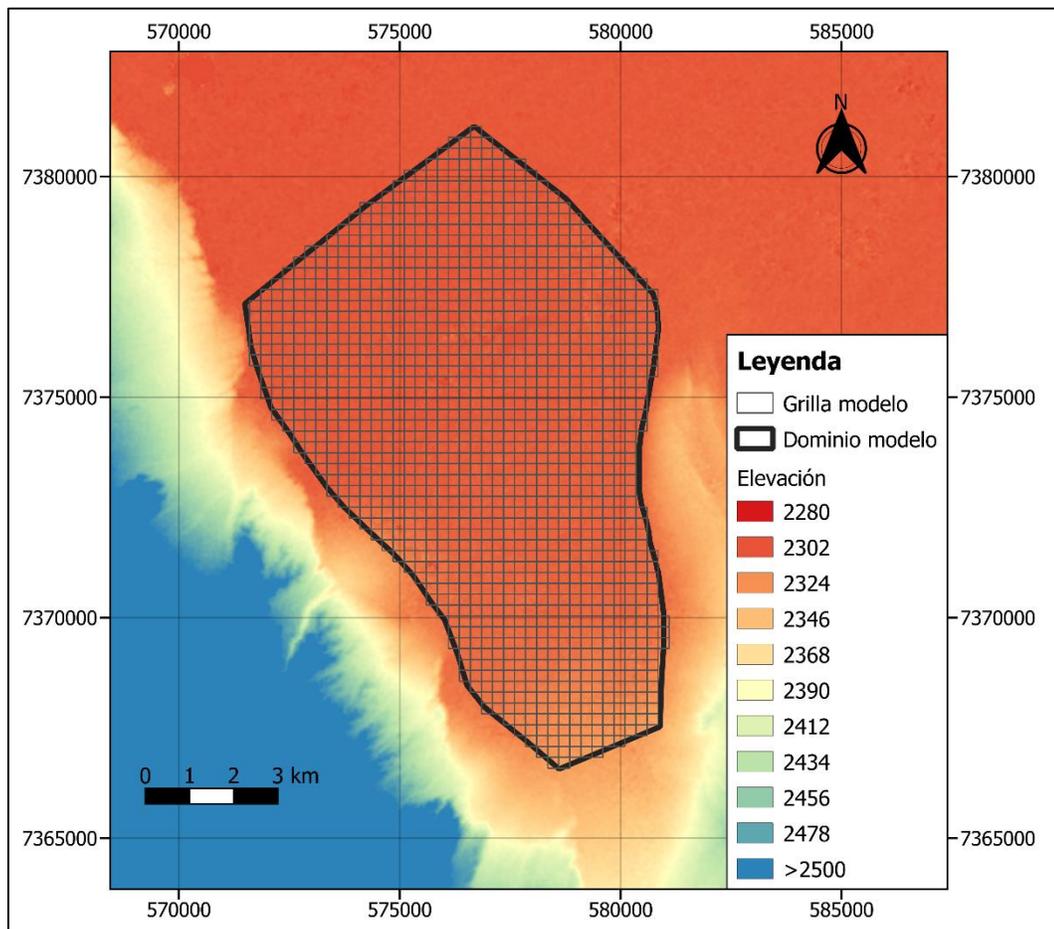
Se considera una configuración temporal permanente para el modelo de flujo, donde el tiempo de simulación del modelo debe ser el suficiente para alcanzar un estado estacionario en las concentraciones y niveles del sistema, siendo igual a 200,000 días, tiempo que se encuentra dividido en 10,000 pasos de tiempos. En el caso del modelo de transporte, la discretización temporal de cada uno de los pasos de tiempo se ajusta automáticamente para cumplir diversos criterios de convergencia y estabilidad mencionados anteriormente.

Con respecto al modelo de transporte, se considera como elementos de estudio la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), la cual se relaciona con la densidad de manera lineal hasta cierto límite, dada por una concentración de 300 g/l.

Para las condiciones iniciales, se consideró como nivel piezométrico inicial la cota topográfica del sistema, mientras que para el modelo de transporte se consideró una concentración de SDT inicial en las primeras 12 capas del modelo un valor de 2 g/l, correspondiente a la información del agua dulce de la recarga de la zona de estudio, mientras que en las últimas 12 capas del modelo se consideró una concentración de SDT igual a 300 g/l, correspondiente a los valores de la salmuera.

Cabe destacar que los valores definidos para la discretización espacial y temporal se adecuan a la capacidad computacional, debido al enorme gasto de recursos que conlleva un modelo de estas características y dimensiones.

Figura 6-10: Dominio del modelo numérico y elevación de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

6.4.2. Condiciones de borde

En el caso de las condiciones de borde impuestas en el modelo, como se muestra en la Figura 6-11, se tienen las siguientes consideraciones para cada elemento:

- **Borde salmuera:** Se considera una condición de carga hidráulica constante, desde el layer 2 hasta el layer 20 (para evitar problemas con que el nivel se encuentre por debajo del límite inferior de la celda), con valor de 2,299.4 m según la información de los pozos de observación ubicados en el límite, dados por TPB-3 y TPB-5, donde además se considera una concentración constante de SDT con valor de 300 g/l, siendo el promedio de los datos fisicoquímicos mostrados en la Tabla 6-2 para el sector Salar, junto con estar asociada dichas aguas a una densidad de 1,200 kg/m³, según la caracterización zonal mostrada en la Sección 6.3.4.
- **Borde agua dulce:** Se considera una condición de recarga subterránea a partir de la capa 6 hasta la capa 10, debido a la alta topografía y a la profundidad de la ubicación del nivel piezométrico, con un caudal total de 600 l/s según los resultados de estudios anteriores, asociada a una densidad de aproximadamente 1,000 kg/m³, y con una concentración de SDT de 2 g/l según los datos fisicoquímico del sector Callejón mostrados en la Tabla 6-2.
- **Límite inferior del modelo:** Se considera una concentración de SDT constante e igual a 300 g/l, debido a que se asume completamente saturado de salmuera el fondo del modelo.
- **Evaporación:** Se consideran las zonas y tasas anuales mostradas en la Figura 6-4 y Tabla 6-1 según el trabajo de SGA (2015). También, se asume una profundidad de extinción de 2 m, con el fin de no aumentar la exigencia numérica del modelo, estandarizando dicha variable, además que no afectar de manera significativa la interfaz salina. En la Tabla 6-3 se muestran las tasas consideradas para cada zona:

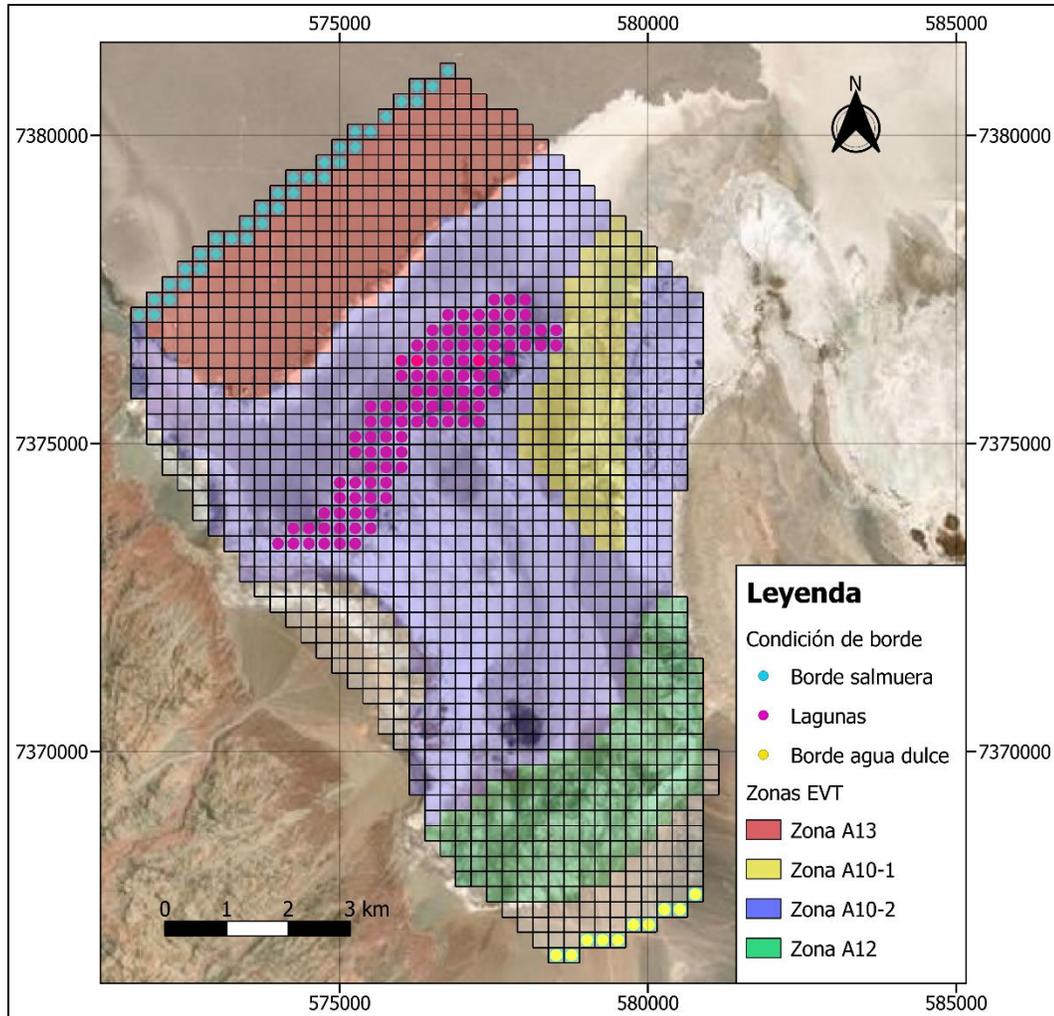
Tabla 6-3: Zonas y tasas de evaporación consideradas – Caso estudio

Zona de evaporación	Tasa de evaporación (mm/d)
Zona A13	0.058
Zona A10-1	0.846
Zona A10-2	1
Zona A12	0.31

Fuente: Elaboración propia.

- **Representación lagunas:** Se considera una condición de drenaje, con una elevación dada por la topografía del lugar, además de considerar una conductancia elevada dada por 1,000 m²/d, con el fin de facilitar la salida de agua por dicha condición. No se considera para representar las salidas por las lagunas ni evaporación ni carga constante, debido a los problemas numéricos que generaría la primera debido al alto valor de las tasas de evaporación, ni la segunda opción debido a que impone una condición de nivel ficticia, siendo que las lagunas se generan como resultado de la interacción entre la salmuera y el agua dulce de la recarga subterránea.

Figura 6-11: Condiciones de borde impuestas en el modelo – Caso estudio



Fuente: Elaboración propia.

6.4.3. Parámetros hidráulicos y pozos de observación

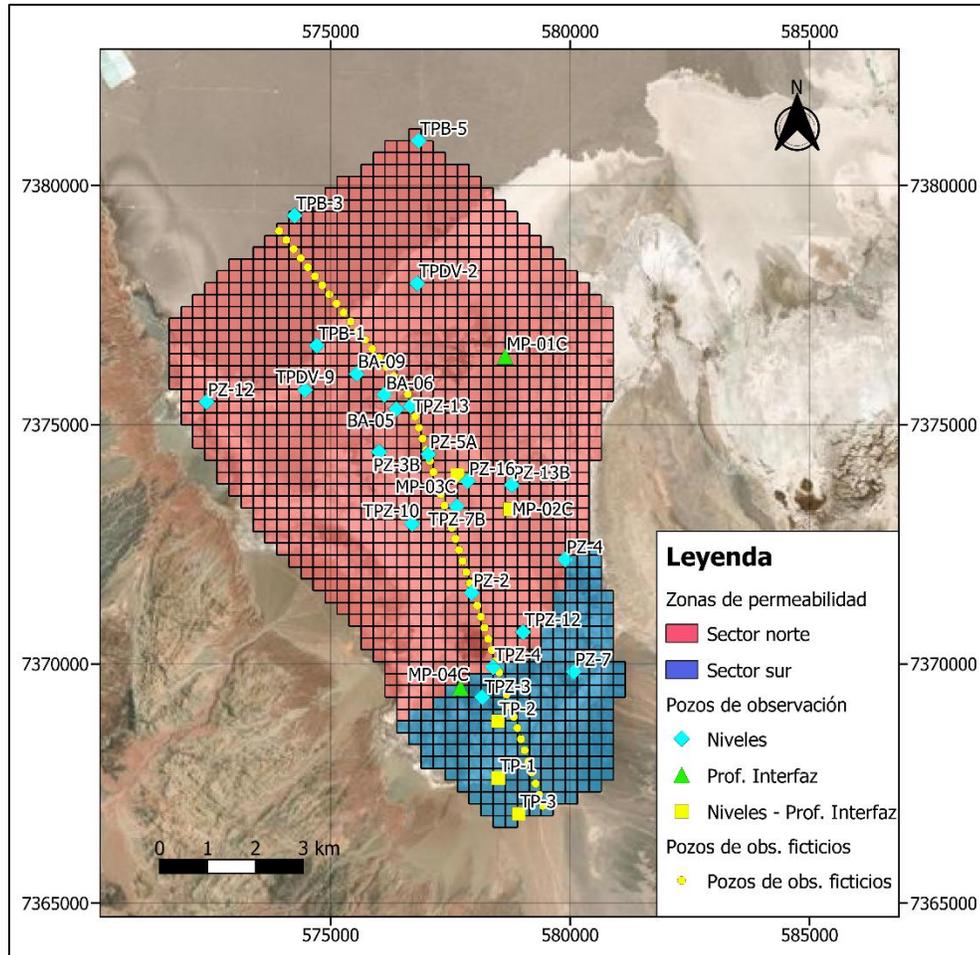
Primero, y dada la discretización espacial utilizada, se asume una dispersión longitudinal de 125 m con el fin de cumplir los criterios del número de Péclet, correspondiente a la mitad del tamaño de celda. Además, se considera una dispersión transversal de 0.01 veces la longitudinal, con un valor de 1.25 m, mientras que la dispersión vertical se considera 0.0005 veces la longitudinal con un valor de 0.0625 m, el cual se obtuvo producto de un proceso de calibración con información de la concentración de SDT en profundidad de los pozos de observación.

Con respecto a las zonas de permeabilidad, se consideran dos zonas tal como se muestra en la Figura 6-12, las cuales se definen según la geología del lugar, y los niveles a lo largo de un perfil longitudinal del modelo. No se considera el basamento debido a los problemas numéricos que genera en el modelo de transporte una unidad con tan baja permeabilidad.

En el caso de la relación entre densidad y concentración, se considera un valor igual a 0.6667, lo cual se desprende de la información fisicoquímica mostrada en la Figura 6-6, donde la densidad de la salmuera igual a $1,200 \text{ kg/m}^3$ está asociada a una concentración de 300 g/l, mientras que para el agua dulce o de referencia se considera una densidad de $1,000 \text{ kg/m}^3$ relacionada a una concentración nula de SDT.

Para los pozos de observación, se consideran aquellos que poseen información de niveles para el proceso de calibración del estado permanente realizado en los trabajos de Golder (2018) y SGA (2015), como también se construye un perfil de puntos ficticios separados en 250 m aproximadamente, con el fin de evaluar los niveles a lo largo del modelo, tal como se muestra en la Figura 6-12.

Figura 6-12: Zonas de permeabilidad y pozos de observación considerados – Caso estudio



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la ubicación de la interfaz salina en superficie y zonificación del tipo de aguas según su densidad, tal como se mostró en la Figura 6-7, en la Tabla 6-4 se muestra la equivalencia de dichas zonas con la concentración de SDT, considerando la relación densidad-concentración definida anteriormente, y un valor máximo para la salmuera dado por una densidad de 1.2 g/cm³ y concentración de SDT igual a 300 g/l.

Tabla 6-4: Tipos de agua según su densidad y concentración de SDT

Tipo de agua	Densidad (g/cm ³)	SDT (g/l)
Agua dulce	1 – 1.04	0 – 60
Salobre	1.04 – 1.08	60 – 120
Salmuera	1.08 – 1.2	>120

Fuente: Elaboración propia.

6.5. Resultados del caso estudio

6.5.1. Limitaciones del modelo numérico en representar el caso estudio

Primero que todo, y al no poseer una topografía de detalle de la zona estudio, siendo recomendada una del orden de centímetros cuando la evaporación juega un rol importante en la dinámica del sistema según la guía del SEA (2015), las salidas por evaporación no se encuentran representada adecuadamente, sobre todo en el sector del núcleo del salar donde el desnivel topográfico es bajo, pudiendo influir en la distribución de la concentración de SDT dado el concepto de evapoconcentración.

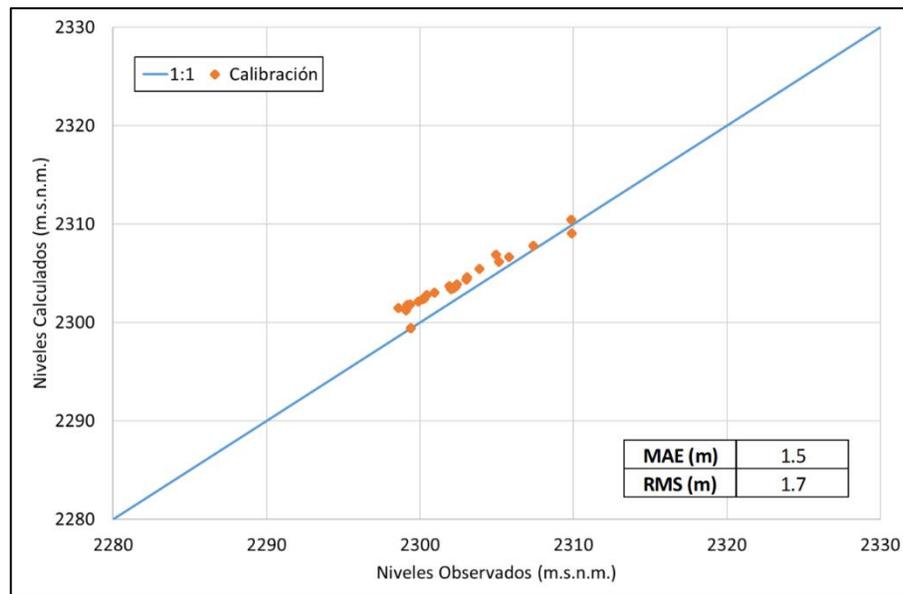
Por otro lado, existen algunos elementos que no fueron representados, como lo sería el canal de disolución que se genera aguas debajo de las lagunas, o los denominados “bull’s eyes (Hamann et al, 2015), los cuales corresponden a salidas de aguas del sistema. Dichos elementos no fueron incluidos debido a que el foco está en representar la interfaz salina en profundidad de la zona estudio, además de ser variables en el tiempo, escala temporal no abarcada en este modelo.

También, no se posee información en detalle de los pozos de observación considerados, como lo sería la cota topográfica a la cual se encuentran, o la profundidad del nivel estático. Por lo tanto, la calibración obtenida puede contener errores debido a que los datos observados no se encuentran ajustados al modelo numérico.

6.5.2. Resultados de la calibración

Como resultado del proceso de calibración, donde cada una de las simulaciones del modelo demora aproximadamente 30 horas, se obtienen valores de permeabilidad para el sector norte y sur iguales a 900 y 200 m/d respectivamente, donde en la Tabla 6-5 y Figura 6-13 se muestran los valores y estadísticos asociados a los niveles simulados. Además, en la Figura 6-14 se muestra un perfil longitudinal del modelo, con la topografía, niveles calculados y niveles observados en los pozos de observación colindantes al perfil.

Figura 6-13: Gráfico de niveles calculados y observados – Caso estudio



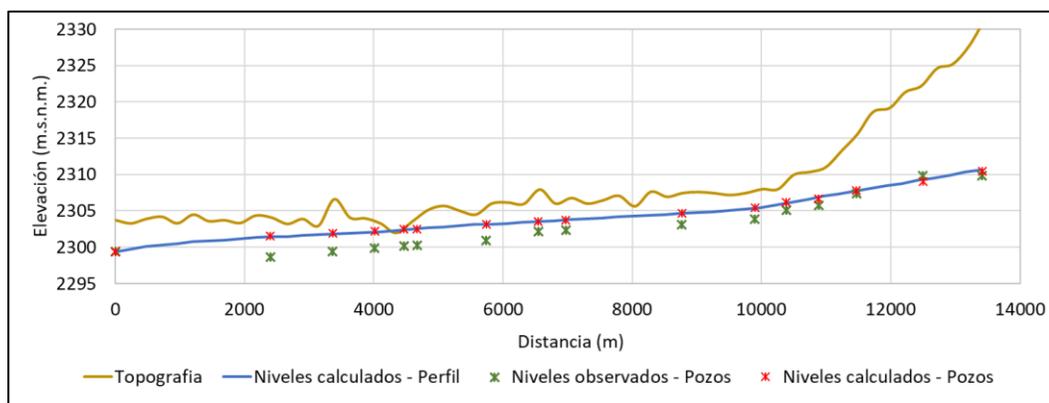
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-5: Resultado calibración de los pozos de observación – Caso estudio

Nombre	Nivel observado (m.s.n.m.)	Nivel Calculado (m.s.n.m.)	Residual (m)
BA-05	2,300.2	2,302.4	-2.2
BA-06	2,299.9	2,302.2	-2.3
BA-09	2,299.4	2,301.8	-2.5
MP-02C	2,302.4	2,303.9	-1.5
MP-03C	2,302.0	2,303.4	-1.4
PZ-12	2,299.1	2,301.4	-2.3
PZ-13B	2,302.2	2,303.5	-1.3
PZ-16	2,302.1	2,303.4	-1.3
PZ-2	2,303.1	2,304.6	-1.5
PZ-3B	2,300.4	2,302.8	-2.4
PZ-4	2,303.0	2,304.4	-1.3
PZ-5A	2,301.0	2,303.0	-2.1
PZ-7	2,305.0	2,306.9	-1.9
TP-1	2,309.9	2,309.0	0.8
TP-2	2,307.4	2,307.8	-0.4
TP-3	2,309.9	2,310.4	-0.5
TPB-1	2,298.6	2,301.5	-2.9
TPB-3	2,299.4	2,299.4	0.0
TPB-5	2,299.4	2,299.4	0.0
TPDV-2	2,299.1	2,301.2	-2.1
TPDV-9	2,299.2	2,301.8	-2.6
TPZ-10	2,301.9	2,303.7	-1.8
TPZ-12	2,303.9	2,305.4	-1.5
TPZ-13	2,300.3	2,302.4	-2.1
TPZ-3	2,305.8	2,306.7	-0.9
TPZ-4	2,305.1	2,306.1	-1.0
TPZ-7B	2,302.3	2,303.6	-1.3

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-14: Perfil longitudinal con niveles calculados – Caso estudio

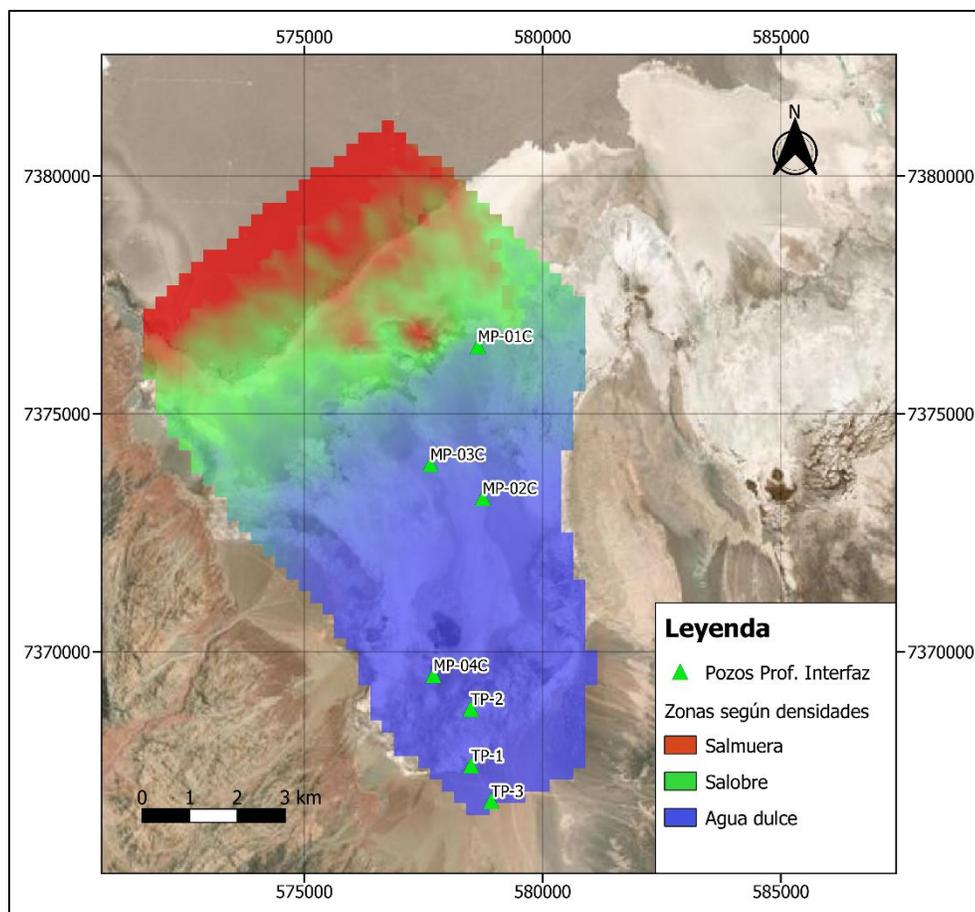


Fuente: Elaboración propia.

Con esto, se ve que los residuales son bajos, con un promedio absoluto (MAE) menor a 2 m, y con niveles calculados que se encuentran por sobre lo observado. Por otro lado, y dado que se tiene escasa información sobre la cota de terreno de los pozos de observación (solo de TP-1, TP-2 y TP-3), ni tampoco se cuenta con una topografía de detalle del sector (la cual además se va modificando continuamente debido a los procesos de dilución), puede que existan errores en los valores asociados a las cotas piezométricas de los pozos de observación, sobre todo en zonas cercanas al núcleo del salar, por lo que se pueden generar errores en el proceso de calibración y el cálculo de los estadísticos.

Ahora, y con respecto a la clasificación de las aguas según la densidad, en la Figura 6-15 se muestra la distribución en superficie de ellas, la cual se asemeja a la determinada por Golder (2018). Cabe notar que existen ciertas zonas donde la distribución no es homogénea, lo cual se puede deber a la evapoconcentración del lugar, como también al control que ejercen las condiciones de borde dadas por los drenes.

Figura 6-15: Zonas según densidades y pozos de observación con datos de la interfaz – Caso estudio



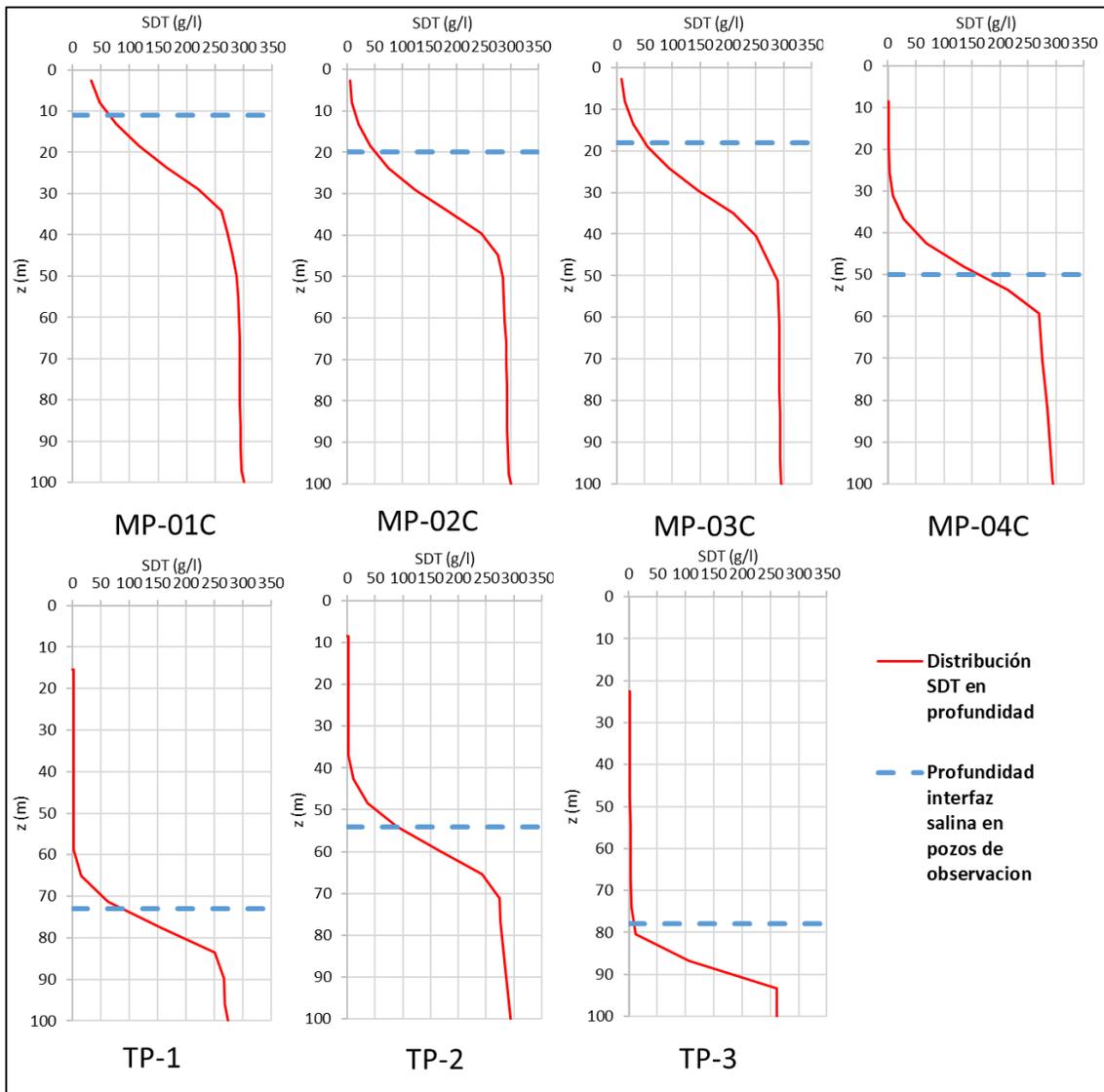
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los pozos con información de la profundidad de la interfaz, en la Figura 6-16 se muestra la distribución en profundidad de la concentración de SDT, donde se aprecia que la profundidad de la interfaz en dichos puntos se acerca a lo observado, sobre todo si se considera que la salmuera corresponde a aquellas concentraciones mayores a 120 g/l. Cabe destacar que, para representar numéricamente la transición de agua dulce a salmuera en el perfil, se tiene que ésta es controlada fuertemente por la dispersión vertical, donde al considerar una dispersión menor se logra

un cambio más abrupto de las aguas, pero generando problemas numéricos a partir de cierto valor, por lo que se consideró adecuada una dispersividad vertical 0.0001 veces la dispersividad longitudinal según el resultado obtenido. Además, la discretización vertical igual tiene un rol preponderante como se mostró en capítulos anteriores, mejorando la definición de la interfaz y la zona de mezcla al considerar una discretización vertical más fina.

La ubicación en profundidad de la interfaz salina también repercute en los niveles en los sectores cercano al borde salmuera, puesto que, al encontrarse los valores altos de la concentración a mayor distancia vertical, los niveles someros en dicho sector son mayores debido a que la densidad es menor, afectando por ende el resultado de la calibración.

Figura 6-16: Perfil en profundidad de la concentración de SDT en los pozos de observación – Caso estudio



Fuente: Elaboración propia.

6.5.3. Resultados de los balances

Con respecto a los flujos a través de las condiciones de borde, en la Tabla 6-6 se presenta el resultado para el proceso de calibración, donde existe una salida importante a través del borde de salmuera, lo cual se debe al alto valor de la permeabilidad y de la recarga subterránea de agua dulce, como también existe un flujo de salida bajo a través de las zonas de evaporación, lo cual se debe principalmente a la profundidad de extinción, siendo menor que la profundidad a la cual se encuentran los niveles piezométricos. Ambas variables corresponde a limitaciones del modelo construido, pudiendo mejorarse si se incorpora una topografía de detalle o se incorporar elementos no considerados.

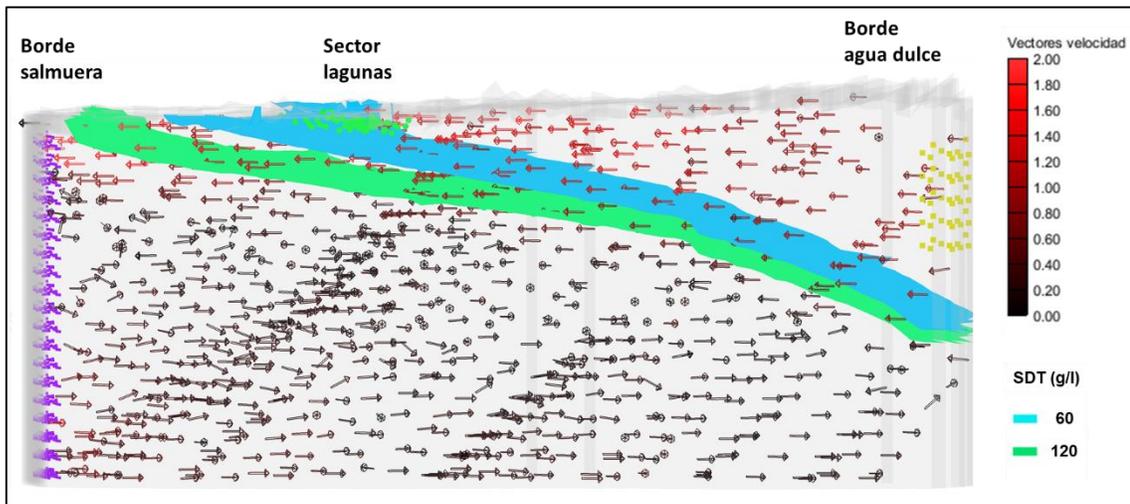
Tabla 6-6: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Caso estudio

Borde Salmuera (l/s)	Borde Agua Dulce (l/s)	Zona Evaporación (l/s)	Salida por lagunas (l/s)
-285.0	600.0	-135.8	-154.8

Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior se refleja en la Figura 6-17, en donde se muestran los vectores de velocidad del modelo construido, observando un flujo de salida de agua con gran velocidad por el borde salmuera en las primeras capas, mientras que en profundidad es un flujo de entrada, donde las líneas de flujo alcanzan el borde de agua dulce aunque con una velocidad baja, siendo consistente con el modelo conceptual de estos sistemas.

Figura 6-17: Vectores de velocidad y superficie de isoconcentración – Caso estudio



Fuente: Elaboración propia.

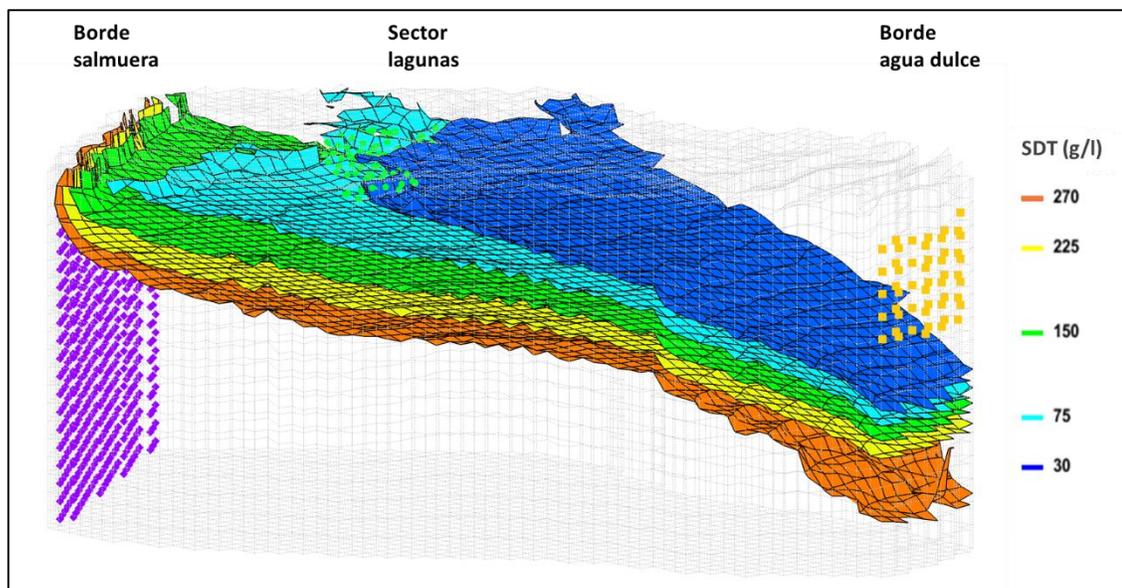
6.5.4. Análisis de la interfaz salina

Primeramente, y dado que el límite inferior del modelo está dominado con concentraciones altas, se omite el análisis del parámetro L_{D_i} puesto que las superficies de isoconcentraciones definidas por la zona de mezcla no cortan con el fondo. Además, se omite el análisis del parámetro R_D , puesto que en el borde de salmuera no existe un ingreso neto de agua, sino que un flujo de salida, por lo que no es comparable con el flujo subterráneo de entrada de agua dulce.

Con respecto al análisis de la interfaz salina, primero se tiene que en la Figura 6-17 se muestra la ubicación de la interfaz salina y la zonificación de las aguas según densidad, donde una concentración de 60 g/l da cuenta del límite entre el agua dulce y salobre, mientras que una concentración de SDT igual a 120 g/l da cuenta del límite entre el agua salobre y la salmuera.

Por otro lado, y para realizar el análisis de la interfaz como se hizo en los Capítulos 4 y 5, se consideran las isoconcentraciones dadas por el 10%-25%-50%-75%-90% de la concentración de SDT impuesta en la condición de borde de salmuera, siendo ésta igual a 300 g/l, tal como se muestra en la Figura 6-18.

Figura 6-18: Isoconcentraciones para el análisis de la interfaz salina – Caso estudio



Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y para determinar los parámetros C_0 y a , se considera para la estimación de la velocidad de entrada el espesor dado por la cota mínima de las celdas que contienen los pozos de la recarga subterránea de agua dulce, y la cota máxima que alcanza el nivel piezométrico en dicho borde, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 6-7. En el caso de la extensión que alcanza la curva de isoconcentraciones del 25% reflejada por el parámetro L_{D_s} , ésta alcanza un valor alto ubicándose justo aguas abajo de la representación de las lagunas, siendo consistente con la zonificación de las aguas según su densidad mostrado en la Figura 6-7.

En el caso de la pendiente y el espesor de la interfaz, y dado que se tienen dos zonas de permeabilidades distintas, se generan dos pendientes en lo que respecta a las superficies de isoconcentraciones, por lo que para realizar el análisis de la interfaz se mide la pendiente y el espesor en ambos tramos siguiendo la dirección del perfil utilizado para la calibración de niveles. Considerando esto, se obtienen los valores para cada tramo mostrados en la Tabla 6-7, donde para el caso de tener una menor conductividad (tramo sur, cercano al borde agua dulce), se genera una pendiente m_s mayor y un espesor W_D menor, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en el Capítulo 5.

Tabla 6-7: Variables adimensionales de interés – Caso estudio

Modelo	Parámetro C_0	Parámetro a	L_{D_s}	W_D	m_s
Caso estudio	88.044	0.005	0.725	-	-
Caso estudio– Tramo Norte	-	-	-	0.145	-0.003
Caso estudio – Tramo Sur	-	-	-	0.113	-0.008

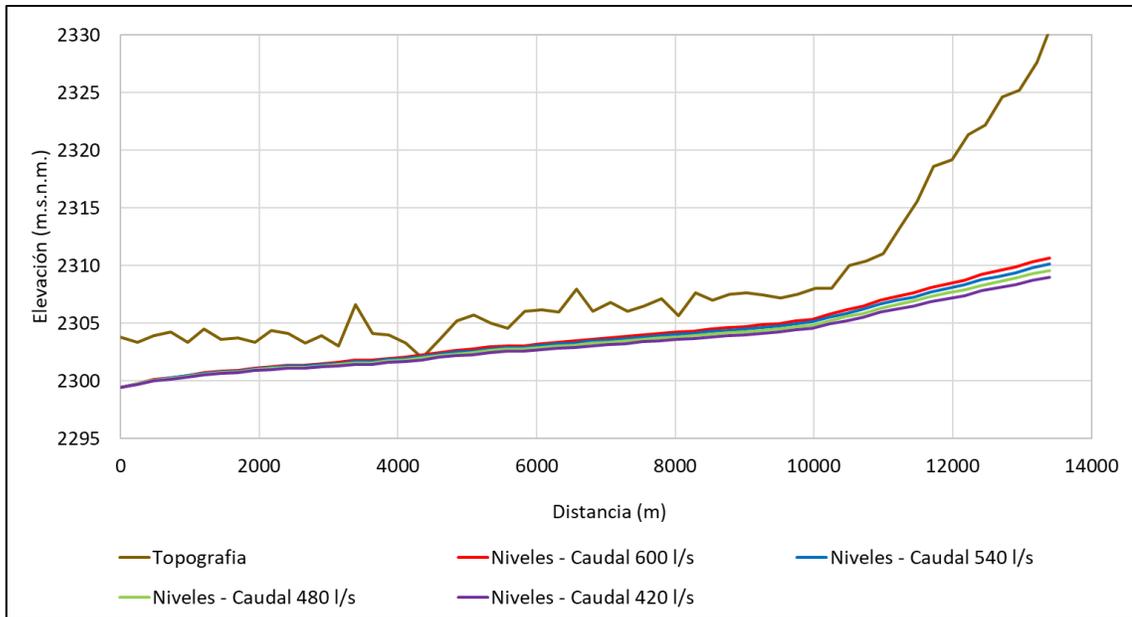
Fuente: Elaboración propia.

6.5.5. Evaluación de reducción de recarga

Para evaluar el efecto de considerar una recarga subterránea de agua dulce menor, se construyen modelos con una reducción del caudal de entrada de un 10%-20%-30%, obteniendo valores de 540-480-420 l/s respectivamente.

Primeramente, y con respecto a los niveles calculados, en la Figura 6-19 se muestra el perfil longitudinal para cada uno de los escenarios de recarga subterránea, donde solo existe un leve efecto en la zona alta cercana al borde agua dulce, mientras que en la zona marginal y de salmuera no se ven afectados.

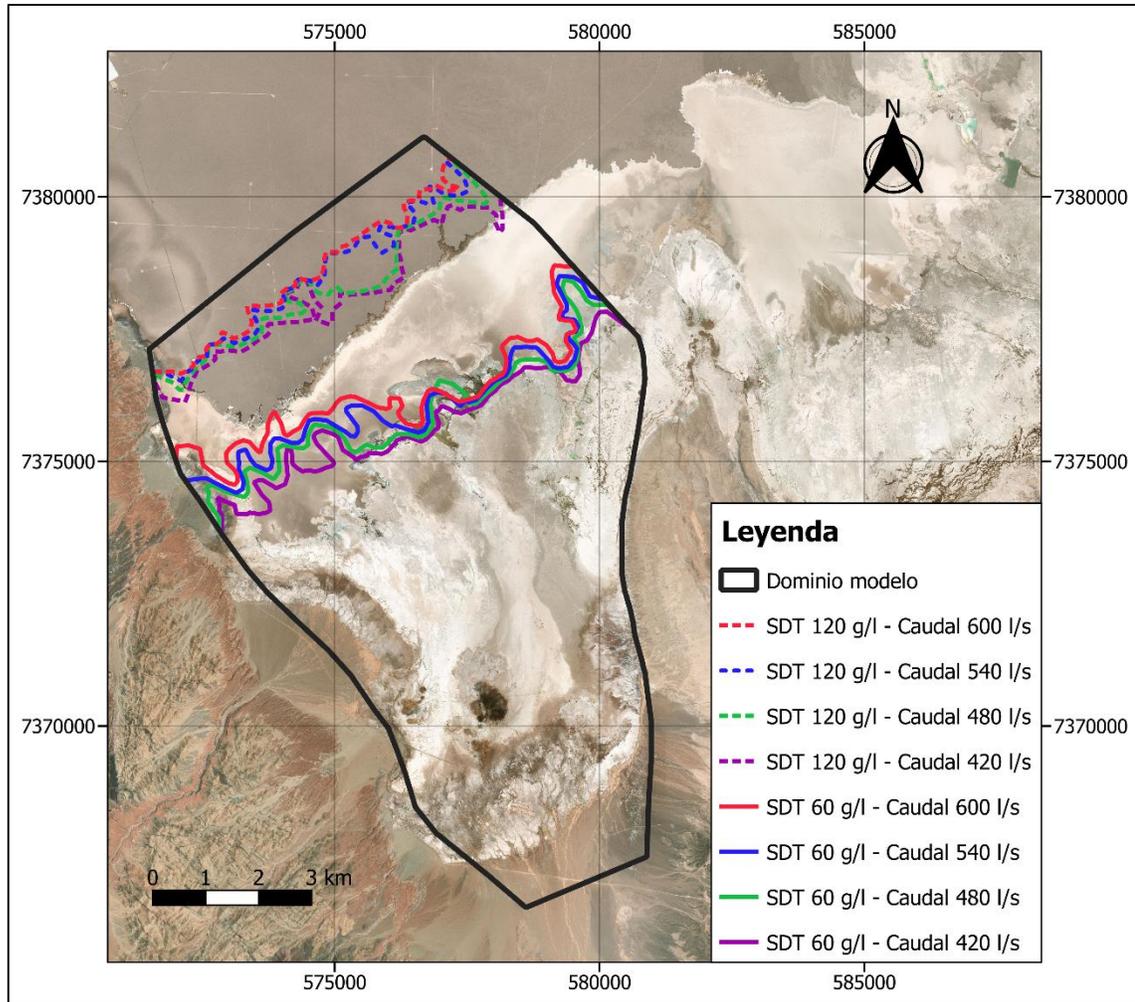
Figura 6-19: Perfil longitudinal con niveles calculados - Evaluación de recarga en caso estudio



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las zonas de las aguas según su densidad, en la Figura 6-20 se muestran las líneas de isoconcentraciones en superficie que delimitan dichas zonas, dadas por valores de SDT iguales a 60 g/l y 120 g/l, donde se aprecia que a medida que disminuye el valor de la recarga de agua dulce, existe un leve retroceso de dichos límites.

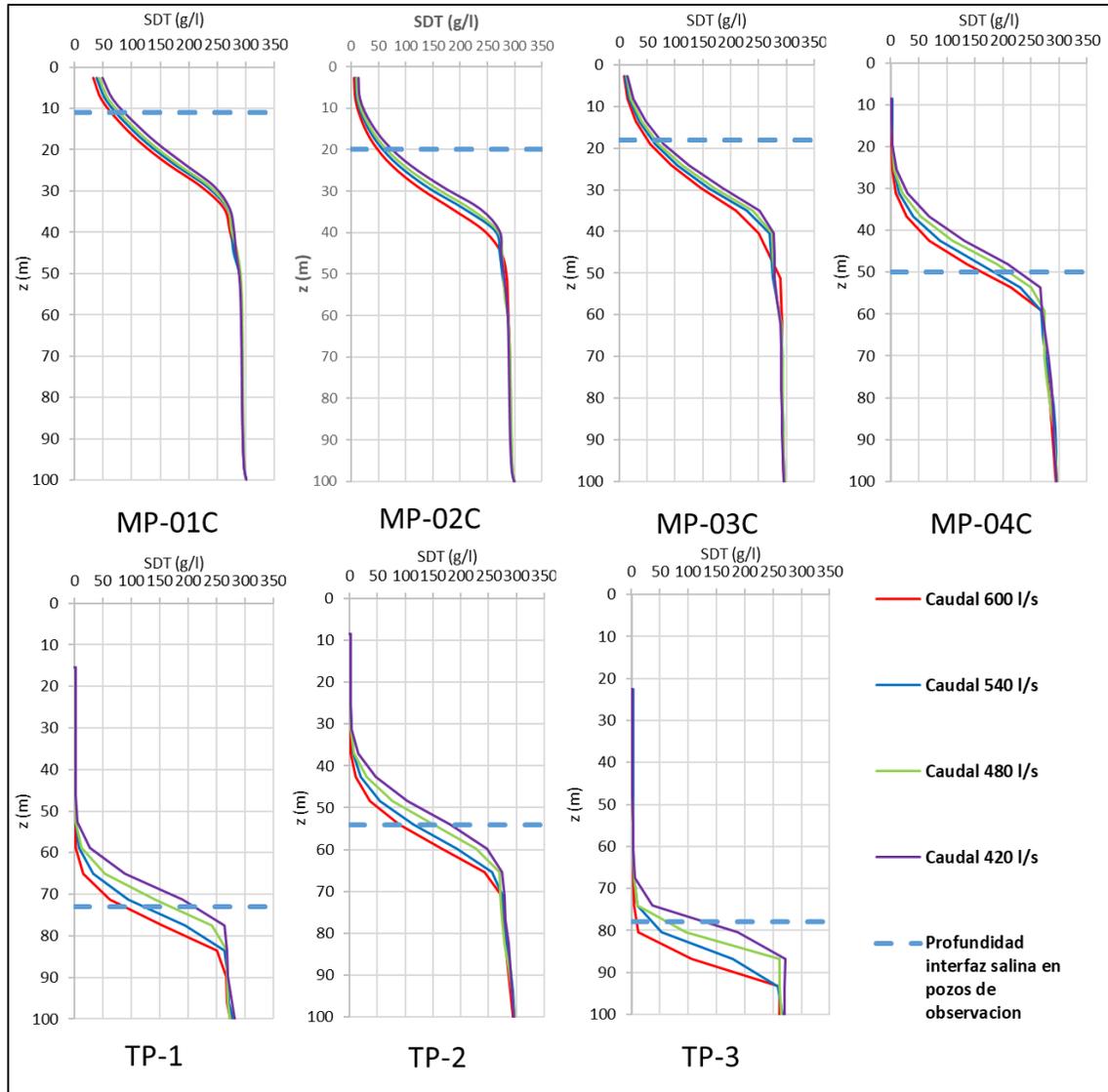
Figura 6-20: Zonas según densidad – Evaluación de la recarga en caso estudio



Fuente: Elaboración propia.

Lo anterior se refleja en los perfiles de concentración de SDT en profundidad para los pozos de observación, mostrados en la Figura 6-21, en donde la profundidad a la cual se ubica la salmuera disminuye a medida que disminuye el caudal de recarga, siendo mayor el impacto cerca del borde de agua dulce.

Figura 6-21: Perfil en profundidad de la concentración de SDT - Evaluación recarga en caso estudio



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los flujos, en la Tabla 6-8 se ve que al disminuir la recarga subterránea de agua dulce disminuyen los flujos netos de las otras condiciones de borde en la misma proporción, estando controladas por el flujo de agua dulce.

Tabla 6-8: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Evaluación recarga en caso estudio

Modelo	Borde Salmuera (l/s)	Borde Agua Dulce (l/s)	Zona Evaporación (l/s)	Salida por lagunas (l/s)
Caudal 600 l/s	-285 (0%)	600 (0%)	-136 (0%)	-155 (0%)
Caudal 540 l/s	-259 (-9%)	540 (-10%)	-123 (-9%)	-135 (-13%)
Caudal 480 l/s	-232 (-19%)	480 (-20%)	-110 (-19%)	-118 (-24%)
Caudal 420 l/s	-203 (-29%)	420 (-30%)	-97 (-28%)	-101 (-35%)

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al evaluar los parámetros adimensionales de interés, se tiene que a medida que disminuye la recarga subterránea de agua dulce, y por ende los parámetros C_0 y a dada la formulación que tienen, el alcance de la interfaz salina en superficie L_{D_s} es menor tal como se muestra en la Tabla 6-9, siendo consistente con lo mostrado en la Figura 6-20.

En el caso de la pendiente m_s , se tiene que ésta disminuye a medida que la recarga subterránea es menor, lo cual corrobora los análisis realizados con el caso hipotético en la Sección 5.4.2. Lo mismo ocurre si se comparan los tramos norte y sur, donde a mayor conductividad menor es la pendiente tal como se mostró en la Sección 5.4.1.

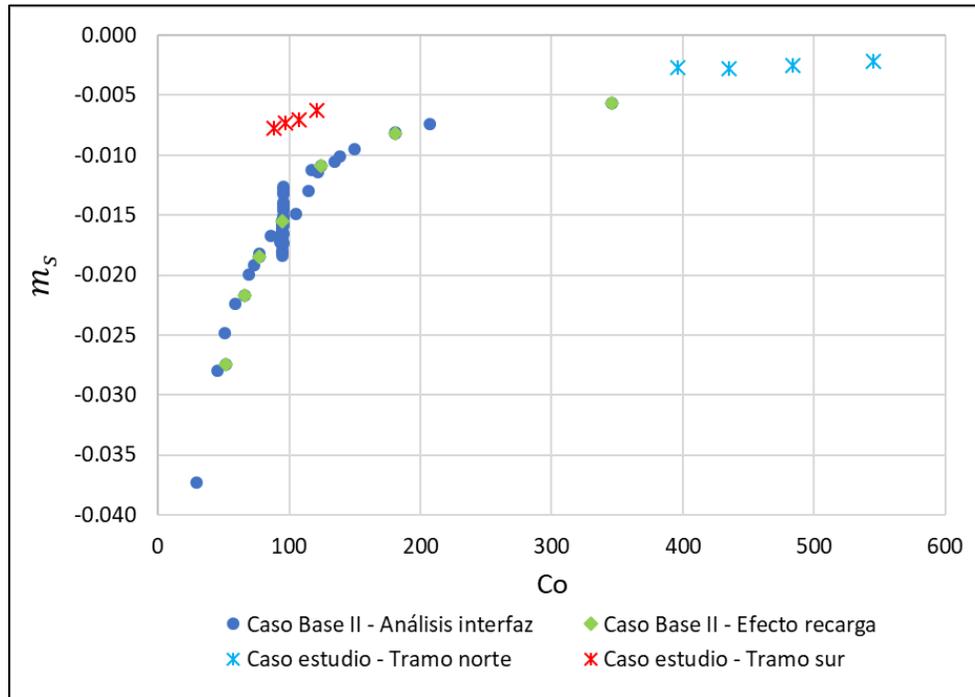
Tabla 6-9: Variables adimensionales de interés – Evaluación recarga en caso estudio

Modelo	Parámetro C_0	Parámetro a	L_{D_s}	W_D	m_s
Caudal 600 l/s – Todo perfil	88.0	0.005	0.725	-	-
Caudal 600 l/s – Tramo norte	-	-	-	0.145	-0.003
Caudal 600 l/s – Tramo sur	-	-	-	0.113	-0.008
Caudal 540 l/s – Todo perfil	96.8	0.005	0.721	-	-
Caudal 540 l/s – Tramo norte	-	-	-	0.150	-0.003
Caudal 540 l/s – Tramo sur	-	-	-	0.120	-0.007
Caudal 480 l/s – Todo perfil	107.5	0.004	0.713	-	-
Caudal 480 l/s – Tramo norte	-	-	-	0.148	-0.003
Caudal 480 l/s – Tramo sur	-	-	-	0.110	-0.007
Caudal 420 l/s – Todo perfil	121.2	0.004	0.665	-	-
Caudal 420 l/s – Tramo norte	-	-	-	0.150	-0.002
Caudal 420 l/s – Tramo sur	-	-	-	0.118	-0.006

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, y al graficar la pendiente de la interfaz m_s con el valor de los parámetros C_0 , tal como se muestra en la Figura 6-22, se ve que existe un comportamiento similar a lo evaluado en el Caso Base II en la Sección 5.5, solo que desplazada y con una variación de la pendiente menor que en los modelos hipotéticos.

Figura 6-22: Relación entre los parámetros m_s y Co – Evaluación recarga en caso estudio



Fuente: Elaboración propia.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Dados los resultados de este trabajo, se presentan conclusiones para cada una de las temáticas desarrolladas, desde la construcción de los modelos bases y la evaluación de parámetros, hasta la construcción del modelo para el caso estudio.

7.1.1. Conclusiones con respecto al proceso de construcción de modelos considerando flujo con densidad variable

En el caso del proceso de construcción de un modelo considerando flujo con densidad variable, primero destaca la cantidad de recursos computacionales necesarios para obtener resultados de un modelo numérico con estas características, debido a lo complejo de las ecuaciones que representan estos sistemas, a la elevada refinación de la grilla necesaria para reducir problemas numéricos en la resolución de las ecuaciones, y al esquema de solución utilizado por SEAWAT.

Ahora, y al tratar de describir la hidrodinámica de un salar con el código SEAWAT, se tiene que las líneas de flujo y la distribución de la concentración se asemeja a la conceptualización empleada como base, donde se genera una interfaz salina similar a una cuña, ocasionando que la recarga subterránea de agua dulce ascienda y genere los afloramientos descritos, tal como se mostró en la Figura 4-9. Esto da indicios de la factibilidad de usar modelos numéricos para representar la dinámica de estos sistemas tan complejos.

Con respecto a los resultados del Capítulo 4 sobre los efectos de las variables relacionadas a la construcción de estos modelos, primero se tiene que el espesor tiene un rol importante, puesto que condiciona el desarrollo de la interfaz salina dada la condición de no flujo del fondo, siendo preferible que se encuentre desconectado de esta última. Además, resulta importante la implementación de las condiciones de borde que representan ambos tipos de agua, puesto que se fuerza y acota el desarrollo de la interfaz salina en ciertas dimensiones, pudiendo no ser representativa. En particular destaca la profundidad de la implementación de la zona de recarga, donde en caso de que la dimensión longitudinal del modelo sea insuficiente junto con que la condición de borde lateral se extienda en la dirección vertical hasta el fondo, puede que no se obtenga una buena representación de la distribución en profundidad de la concentración, y por ende, de la interfaz salina.

Por otro lado, la discretización de la grilla, en particular la refinación vertical, juega un rol importante en la modelación de estos sistemas, puesto que la principal forzante de los cambios de densidad se encuentra en la dirección vertical, por lo que la discretización debe ser lo suficientemente fina para representar adecuadamente la interfaz salina, aunque conlleva un aumento considerable en los tiempos de cálculos. También influye en las salidas por evaporación, puesto que ésta se caracteriza por una profundidad de extinción, estando condicionada por la discretización vertical de las celdas y por la posibilidad del secado de celdas en el modelo de flujo.

Finalmente, y si se acotan algunos parámetros a valores mínimos y máximos, como lo sería la densidad o la concentración (sobre todo si ésta última se considera nula), se pueden incurrir en errores en los resultados debido a la dispersión numérica, como también el generar condiciones de inestabilidad del modelo, por lo que se recomienda no imponer límites para dichas variables, además de verificar que los resultados tengan sentido físico, como por ejemplo, que la concentración sea positiva.

7.1.2. Conclusiones con respecto al comportamiento de la interfaz salina frente a los distintos parámetros

Primeramente, se tiene que el análisis y el estudio de la interfaz salina con los parámetros definidos en esta tesis es adecuado, puesto que permite cuantificar la evolución de la zona de mezcla y compararla al evaluar los distintos parámetros, corroborando lo realizado en otros estudios sobre flujo con densidad variable. Cabe destacar que los resultados corresponden al estado estacionario que alcanzaría el sistema si las condiciones impuestas se mantienen en el tiempo.

Además, cabe destacar el cambio de condición de borde en la zona de recarga de agua dulce para el caso base II, donde al pasar de una condición de carga constante a una condición de flujo, el resultado para los flujos y el desarrollo de la interfaz salina es similar entre ambos modelos bases, siendo preferible la segunda opción si es que se está evaluando la evolución y dinámica de estos sistemas.

Con respecto a los parámetros que no afectan de manera significativa la forma de la interfaz salina, destacan la porosidad y la anisotropía de la conductividad hidráulica, donde el primero tiene como único efecto que el sistema alcance antes el estado estacionario, lo cual se debe a que la velocidad considerada en el transporte es mayor. Mientras que la anisotropía vertical, y por ende el gradiente de la conductividad hidráulica en la dirección vertical, no tienen efecto sobre el sistema evaluado, aunque en caso de existir un estrato confinante pudiera tener algún rol en la dinámica desarrollada, escenario no considerado en esta tesis.

Por otro lado, y si consideramos la recarga de agua dulce, la conductividad hidráulica, y la dispersividad, se tiene que éstas sí afectan significativamente la dinámica del sistema. En el caso de la recarga de agua dulce y la conductividad hidráulica, estas controlan de manera similar el desarrollo de la interfaz salina y el comportamiento de las variables analizadas, donde el efecto tiene que ver más con los niveles que se alcanzan en el sistema en donde se impone el flujo de entrada. Con esto, la forma de la interfaz salina y el alcance de la zona de mezcla queda determinada por la diferencia de energías de ambas condiciones de borde y el enfrentamiento entre el agua dulce y la salmuera. El resultado obtenido para los parámetros analizados permite conocer a priori los efectos en el sistema de las variaciones de la conductividad y los flujos de recarga, ayudando por ejemplo en el proceso de calibración o en la estimación de la recarga.

En cambio, y al considerar la dispersividad vertical, se tiene que ésta afecta de manera importante la interfaz salina y la distribución de la concentración, donde a pesar de que los niveles piezométricos que alcanzan los distintos casos evaluados son similares, existen variaciones importantes en la interfaz salina, lo cual es consistente con estudios anteriores, que dan cuenta de que el espesor de la zona de mezcla depende de la dispersividad (Abarca et al, 2006). Es por esto que resulta importante definir un valor apropiado para la dispersión, debido a que puede condicionar fuertemente los resultados y distribución de la concentración.

Ahora, y si se analizan y relacionan los distintos parámetros adimensionales evaluados, se tiene que la pendiente de la interfaz salina m_s y el parámetro Co de Holzbecher están estrechamente relacionados, quedando levemente fuera de la tendencia solo aquellos casos relacionados con la dispersividad, lo cual da cuenta de un efecto independiente sobre la interfaz salina de dicho parámetro, tal como se muestra en Figura 5-6. Además, permite extrapolar algunos resultados en caso de que se consideren otros valores para las variables involucradas.

En el caso de extender los análisis de algunos casos evaluados a un modelo en tres dimensiones, se observan que poseen los mismos comportamientos que los estudiados en el perfil en dos

dimensiones. por lo que es factible el desarrollo de modelos en 3D con flujo considerando densidad variable extrapolando los resultados sobre el comportamiento de la interfaz salina.

Como comentario final sobre este punto, se tiene que al saber el comportamiento a priori de estos sistemas frente a los distintos parámetros como se mostró en el Capítulo 5, se facilitaría el proceso de calibración de modelos que representen sistemas con densidad variable, debido a que se tendrían nociones sobre cómo respondería el modelo frente a cambios en los parámetros.

7.1.3. Conclusiones con respecto a la elaboración de un modelo en tres dimensiones considerando flujo con densidad en el sector sur del Salar de Atacama

Primeramente, y a pesar de las limitaciones presentadas, como por ejemplo la no representación del canal de disolución, se pudo representar de manera adecuada la dinámica del sector sur del Salar de Atacama, en particular lo relacionado a la distribución de la concentración de SDT y las líneas de flujo, aunque la calibración de niveles se aleja de lo observado debido principalmente a las diferencias que pudieran existir con la topografía y la falta de información de los pozos, además de la escasa zonificación de permeabilidades utilizada, siento el foco del modelo representar la dinámica de estos sistemas y corroborar algunos resultados de éste trabajo.

Además, y a pesar de que se simplifican procesos que ocurren en los salares, tal como la disolución continua de sales como las reacciones químicas, sí se pueden realizar evaluaciones sobre el caso estudio que son consistentes y esperadas en este tipo de sistemas.

Con respecto a la recopilación de información de la zona de estudio, resultan importantes los datos relacionados a la calidad de las aguas, sobre todo la distribución en profundidad de la concentración o densidad, puesto que para realizar la calibración de parámetros que controlan la interfaz salina es fundamental conocer tanto su ubicación y como extensión.

Junto con lo anterior, destaca lo dificultoso del proceso de calibración, puesto que se deben observar a la vez niveles piezométricos y la distribución de la concentración del soluto, los cuales también se encuentran controladas por parámetros hidrogeológicos de manera diferenciada.

En el caso del basamento y las zonas de baja permeabilidad, se tiene que, al intentar implementarlas en el modelo, se generaron errores de convergencia no llegando a resultado, por lo que para este trabajo se omitieron y se consideraron como límite inferior del modelo.

Por otro lado, y con respecto al desarrollo de la interfaz salina, puede que éste no haya sido completo debido a la extensión del modelo y el espesor de éste, aunque también influye el alto valor del flujo subterráneo de recarga, siendo elevada la energía del borde de agua dulce. Esto también se refleja en que existe un flujo de salida por el borde de salmuera, donde conceptualmente la principal salida es por las zonas de evaporación y los afloramientos. Además, cabe destacar la ausencia de una topografía de detalle, que hubiera ayudado a representar de mejor forma ambas salidas, junto con la ausencia del canal de disolución en la conceptualización, pudiendo ser una salida de agua importante.

En el caso de las lagunas, se tiene que la representación de la dinámica de estos no es completa, donde las aguas que las forman son generadas por afloramientos de agua dulce, pero otros procesos como la disolución o la evapoconcentración no se pueden evaluar, dada la forma en que fueron implementadas, siendo además una de las limitaciones del programa usado.

Ahora, y al realizar el análisis de los parámetros adimensionales, se observa un comportamiento similar a lo concluido en el Capítulo 5 al variar los distintos parámetros, además de corroborar la relación entre la pendiente de la interfaz salina m_s y el parámetro Co . Dicha relación puede ser de

interés para trabajos futuros, puesto que la pendiente se relaciona con la dinámica que pudieran tener los sistemas salares.

Finalmente, se tiene que, a pesar de las limitaciones y la consideración de ciertos procesos, los modelos numéricos elaborados representan de manera razonable la dinámica de estos sistemas tan complejos en el régimen permanente, donde al existir un contraste de densidad elevado se genera una interfaz salina brusca, lo cual se corrobora con los datos de concentración de los pozos de observación. Además, se pueden hacer simulaciones a partir del estado estacionario obtenido, modificando las variables y parámetros que definen el sistema, provocando alteraciones en la interfaz salina como también en los flujos de salida.

7.2. Recomendaciones para trabajos futuros

Dado que el foco de este trabajo corresponde a analizar y estudiar el comportamiento de la interfaz salina frente a la variación de parámetros en el régimen permanente, existen tópicos que no fueron abordados debido a la cantidad de recursos para abordar algunos fenómenos como la dificultad de implementarlos.

Dentro de las recomendaciones para trabajos futuros en lo que respecta a modelación de salares considerando flujo con densidad variable bajo la metodología usada, destacan:

- Abarcar la heterogeneidad en la modelación de sistemas salares, lo cual también conlleva un proceso de calibración más acabado pudiendo llegar a mejores resultados. Además, las zonas de baja permeabilidad pueden tener un rol importante en la forma de la zona de mezcla debido a su impacto en los niveles y la distribución de la concentración.
- Considerar configuración temporal transiente para el modelo de flujo, lo que permite evaluar la evolución en el tiempo de la interfaz salina al variar los parámetros de configuración del sistema, además de implementar condiciones de borde variables y pozos de bombeo.
- Considerar la evaluación de un número adimensional que incorpore la dispersión, siendo un parámetro muy importante en lo que respecta a la configuración de la interfaz salina.
- Evaluar el efecto de la difusión molecular, el cual fue despreciado frente a la dispersión mecánica en este trabajo.
- Mejorar el refinamiento de grilla para los modelos en tres dimensiones del caso estudio, además de aumentar la extensión de los límites del modelo, lo cual implica un aumento considerable en los recursos computacionales.
- Considerar los procesos hidrogeoquímicos en la elaboración de modelos con densidad variable e indagar sobre la posibilidad de implementarlos en los modelos numéricos de flujo con densidad variable.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ABARCA, A, CARRERA, J. et al. 2005. Anisotropic dispersive Henry problem. *Revista Advances in Water Resources*. 30:913-926.
- BARLOW, PAUL M. 2003. *Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast*. Virginia, Geological Survey, 113p.
- BOUFADEL, SUIDAN y VENOSA 1999. Numerical modeling of water flow below dry salt lakes: effect of capillarity and viscosity. *Revista Journal of Hydrology*. 221:55-74.
- CUBILLOS, ANIBAL. 2014. *Potencial de litio en salares del norte de Chile [diapositivas]*. SERNAGEOMIN, Chile, 42d.
- DIERSCH, H. y KOLDITZ, O. 2002. Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Revista Advances in Water Resources*. 25:899-944.
- EVANS, D. G. y RAFFENSPERGER, J. P. 1992. On the stream function for variable-density groundwater flow. *Revista Water Resources Research*. 28:2141–2145.
- FAHS, M., ATAIE-ASHTIANI, B. et al. 2016. The Henry problem: New semianalytical solution for velocity-dependent dispersion. *Revista Water Resources Research*. 52:7382-7407.
- FAHS, M., KOOHBOR, B. et al. 2018. A generalized Semi-Analytical Solution for the Dispersive Henry Problem: Effect of Stratification and Anisotropy on Seawater Intrusion. *Revista Water*. 10:230.
- FETTER, C. W. 2001. *Applied hydrogeology*. 4^oed. New Jersey, Prentice-Hall. 598p.
- GARCES MILLAS, INGRID. 2016. *Lagunas, humedales y salares andinos una aventura científica [diapositivas]*. Chile, 21d.
- GOLDER. 2018. *Modelo de densidad variable sector Tilopozo - Proyecto Monturaqui. Evaluación de Impacto Ambiental*. Chile
- GUO, WEIXING y BENNETT, G. D., 1998. Simulation of saline/fresh water flows using MODFLOW. EN: POETER, E. et al. MODFLOW '98 Conference. Golden, Colorado. *Proceedings* 1:267-274.
- GUO, WEIXING y LANGEVIN, C. D., 2002. User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of threedimensional variable-density groundwater flow. U.S. Geological Survey *Techniques of Water Resources* 6: cap A7: 77p.
- HAMANN, E., POST, V, et al. 2015. Numerical investigation of coupled density-driven flow and hydrogeochemical processes below playas. *Revista Water Resources Research*. 51:9338-9352.
- HARBAUGH, BANTA, HILL, MCDONALD 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. U.S. Geological Survey, 92p.
- HERRERA, C. et al. 2015. Groundwater flow in a closed basin with a saline shallow lake in a volcanic area: Laguna Tuyajto, northern Chilean Altiplano of the Andes. *Revista Science of the Total Environment*. 541:303-318.
- HOLZBECHER, EKKEHARD. 2005. Groundwater flow pattern in the vicinity of a salt lake. *Revista Hydrobiologia*. 532:233-242.

- KARATZAS, GEORGE P. 2017. Developments on Modeling of Groundwater Flow and Contaminant Transport. *Revista Water Resour Manage.* 31: 3235-3244.
- KOHFAHL, C., POST, V. et al. 2015. Validity and slopes of the linear equation of state for natural brines in salt lake systems. *Revista Journal of Hydrology.* 523:190-195.
- KONIKOW, SANFORD y CAMPBELL 1997. Constant-concentration boundary condition: Lessons from the HYDROCOIN variable-density groundwater benchmark problem. *Revista Water Resources Research.* 33(10):2253-2261.
- LANGEVIN CHRISTIAN et al. 2007, SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6: cap A22, 39p.
- LU, CHUNHUI, WERNER, ADRIAN et al. 2015. A correction on Coastal Heads for Groundwater Flow Models. *Revista Groundwater.* 53(1):164-170.
- LUSCZYNSKI, NORBERT J. 1961. Head and Flow of Ground Water of Variable Density. *Revista Journal of Geophysical Research.* 66 (12), 4247-4256.
- MARAZUELA, M. A. et al. 2018. 3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). *Revista Journal of Hydrology.* 561:223-235 .
- Modelo Digital de Elevación (DEM) <<http://www.programascomputo.com.mx/evp26.htm>> [consulta: 21 septiembre 2019].
- MUSUUZA, RADU y ATTINGER. 2011. The stability of density-driven flows in saturated heterogeneous porous media. *Revista Advances in Water Resources.* 34:1464-1482.
- NICK, H., RAOOF, A. et al. 2012. Reactive dispersive contaminant transport in coastal aquifers: Numerical simulation of a reactive Henry problem. *Revista Journal of Contaminant Hydrology.* 145:90-104.
- POST, KOOL y SIMMONS 2007. Using Hydraulic Head Measurements in Variable-Density Ground Water Flow Analyses. *Revista Groundwater.* 45(6):664-671.
- REZAEI, M., SANZ, E. et al. 2004. Reactive transport modeling of calcite dissolution in the fresh-salt water mixing zone. *Revista Journal of Hydrology.* 311:282-298.
- SERVICIO DE EVALUACION AMBIENTAL. 2012. Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Chile, Servicio de Evaluación Ambiental. 108p.
- SGA. 2015. Estudio hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama - Proyecto Modificación del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Evaluación de Impacto Ambiental. Chile.
- SIMMONS, C. T., et al. 2010. Variable density groundwater flow: from modelling to applications. EN: *Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas.* Cambridge, Cambridge University Press, pp. 109-139.
- SIMMONS, CRAIG T. 2005. Variable density groundwater flow: From current challenges to future possibilities. *Revista Hydrogeology.* 13:116-119.

- SIMMONS, FENSTEMAKER y SHARP 2001. Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media; approaches, resolutions and future challenges. *Revista Journal of Contaminant Hydrology*. 52:245-275.
- SIMPSON, M. y CLEMENT, T. 2004. Improving the worthiness of the Henry problem as a benchmark for density-dependent groundwater flow models. *Revista Water Resources Research*. 40:W01504.
- STRACK, O., STOECKL, L. et al. 2016. Reduction of saltwater intrusion by modifying hydraulic conductivity. *Revista Water Resources Research*. 52:6978-6988.
- TEJEDA, CIENFUEGOS, MUÑOZ Y DURÁN. 2003. Numerical Modeling of Saline Intrusion in Salar de Atacama. *Revista Journal of Hydrologic Engineering*. 8(1):25-34.
- VASQUEZ, CARLOS et al. 2013. Modeling flow and reactive transport to explain mineral zoning in the Atacama salt flat aquifer, Chile. *Revista Journal of Hydrology*. 490:114-125.
- WERNER, A. et al. 2012. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Revista Advances in Water Resources*. 51:3-26.
- WOOKD, TEUBNER et al. 2003. Numerical error in groundwater flow and solute transport simulation. *Revista Water Resources Research*. 39(6):1158.
- YAGER, KAPPEL y PLUMMER. 2007. Origin of halite brine in the Onondaga Trough near Syracuse, New York State, USA: modeling geochemistry and variable-density flow. *Revista Hydrogeology Journal*. 15:1321-1339.
- YECHIELI YOSEPH y WOOD, WARREN. 2001. Hydrogeologic processes in saline systems: playas, sabkhas, and saline lakes. *Revista Earth-Science Reviews*. 58:343-365.
- YOUNES, A. y MOSE, R. 1998. Modeling Variable Density Flow and Solute Transport in Porous Medium: 1. Numerical model and verification. *Revista Transport in Porous Media*. 35:345-373.
- ZEKTSER, IGOR y EVERETT, LORNE (eds.) 2004. *Groundwater. Resources of the World and their use*. Paris, UNESCO. 346p.
- ZHENG, C. 2006. MT3DMS v5.2 Supplemental User's guide, Report to the US Army Engineer Research and Development Center, Department of Geological Sciences, University of Alabama.
- ZHENG, C. y BENNETT, G. D. 1995. *Applied contaminant transport modeling: theory and practice*. Wiley. 464p.
- ZHENG, C. Y WANG, P.P. 1999. MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants y Groundwater Systems. Documentation and User's guide. Contract Report SERDP-99-1, US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

ANEXOS

ANEXO A. RESULTADOS DE LAS VARIABLES RELACIONADAS A LA CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE FLUJO CON DENSIDAD VARIABLE

A.1. Efectos de la configuración de la grilla

Para evaluar los efectos de la grilla se construyeron modelos variando el espesor de éste, la discretización horizontal, la discretización vertical, y un refinamiento general de la grilla, manteniendo las mismas condiciones de borde y configuraciones del modelo base I, siendo sus resultados los correspondientes al caso base.

A.1.1. Espesor del modelo

Como casos de evaluación, se consideraron valores de 50, 75, 125, 150, 200 y 400 m para el espesor total del modelo (denominados Espesor 1, Espesor 2, Espesor 3, Espesor 4, Espesor 5 y Espesor 6 respectivamente) teniendo el Caso Base un espesor de 100 m, tal como se muestra en la Tabla A-1. Además, las condiciones de borde mantienen la profundidad original impuesta, siendo de 100 m para la condición de Borde Salmuera y de 50 m para el Borde Agua Dulce.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos Tabla A-1, se tiene que para un espesor menor que el Caso Base se obtienen concentraciones negativas para el soluto por lo cual existe un efecto de dispersión numérica en dichos casos. Por otro lado, los niveles mínimos aumentan a medida que el espesor del modelo es mayor, pudiendo existir un efecto de la condición de borde de no flujo del fondo del modelo.

Tabla A-1: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Efecto espesor del modelo

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base (100m)	96.3	112.0	0.0	325.1
Espesor 1 (50 m)	97.0	112.0	0.0	336.8
Espesor 2 (75 m)	96.5	112.0	0.0	329.1
Espesor 3 (125 m)	96.2	112.0	0.0	325.6
Espesor 4 (150 m)	96.5	112.0	0.0	323.8
Espesor 5 (200 m)	97.1	112.0	0.0	325.0
Espesor 6 (400 m)	97.9	112.0	0.0	325.1

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los flujos a través de las condiciones de borde, en la Tabla A-2 se ve que existe un aumento en los flujos de entrada por el Borde Salmuera mientras que disminuyen por el Borde Agua Dulce, pero manteniéndose los flujos de salidas.

Tabla A-2: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Efecto espesor del modelo

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base (100m)	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Espesor 1 (50 m)	0.035	0.150	-0.003	-0.089	-0.093
Espesor 2 (75 m)	0.053	0.170	-0.003	-0.103	-0.117
Espesor 3 (125 m)	0.070	0.140	-0.003	-0.098	-0.109
Espesor 4 (150 m)	0.075	0.134	-0.003	-0.097	-0.109
Espesor 5 (200 m)	0.083	0.126	-0.003	-0.096	-0.110
Espesor 6 (400 m)	0.109	0.114	-0.003	-0.094	-0.126

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo, en Tabla A-3 se tiene que a medida que aumenta el espesor del modelo el parámetro α disminuye, caso contrario del parámetro Co , lo cual da cuenta de una reducción de las fuerzas de potencial hidráulico frente a los procesos convectivos. Además, el factor R_D aumenta hasta casi llegar a uno, pudiendo estar afectado por la condición de carga constante.

Tabla A-3: Variables adimensionales de interés - Efecto espesor del modelo

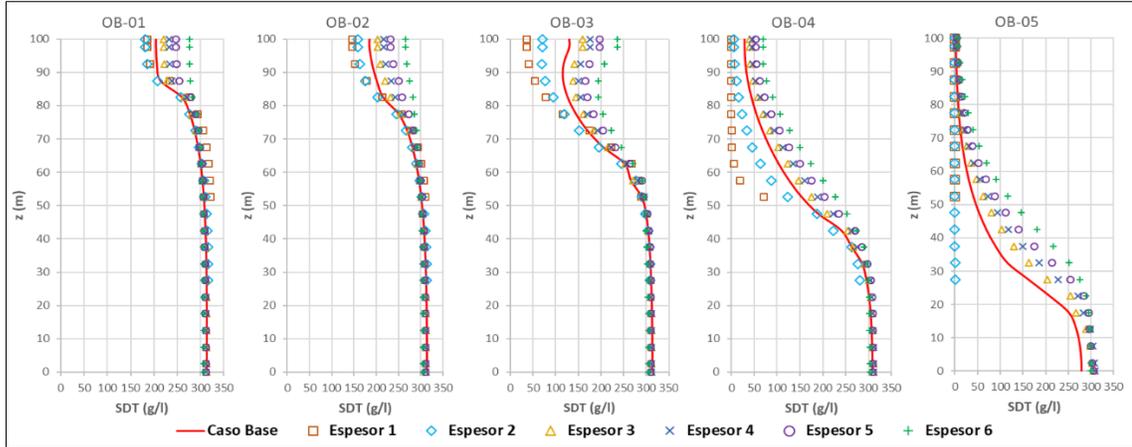
Modelo	Parámetro Co	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base (100m)	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
Espesor 1 (50 m)	96.0	0.013	0.482	0.390	0.133	0.231	-0.026
Espesor 2 (75 m)	84.5	0.010	0.457	0.275	0.159	0.310	-0.021
Espesor 3 (125 m)	102.8	0.005	0.396	0.000	0.211	0.500	-0.011
Espesor 4 (150 m)	107.1	0.004	0.388	0.000	0.209	0.556	-0.011
Espesor 5 (200 m)	112.8	0.003	0.378	0.000	0.212	0.641	-0.010
Espesor 6 (400 m)	95.3	0.001	0.364	0.000	0.211	0.849	-0.010

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, primero se ve en la Tabla A-3 que existe un desplazamiento de ésta, puesto que a medida que aumenta el espesor del modelo, la línea de isoconcentraciones del 75% se desplaza hacia el Borde de Agua Dulce, además de desconectarse del fondo del modelo, como lo reflejan L_{D_s} y L_{D_i} . Por otro lado, el ancho medio de la interfaz salina W_D se mantiene constante para valores mayores o iguales del espesor del caso base, mientras que la pendiente m_s disminuye a medida que aumenta el espesor, y debido principalmente a la desconexión entre la interfaz salina y el fondo del modelo.

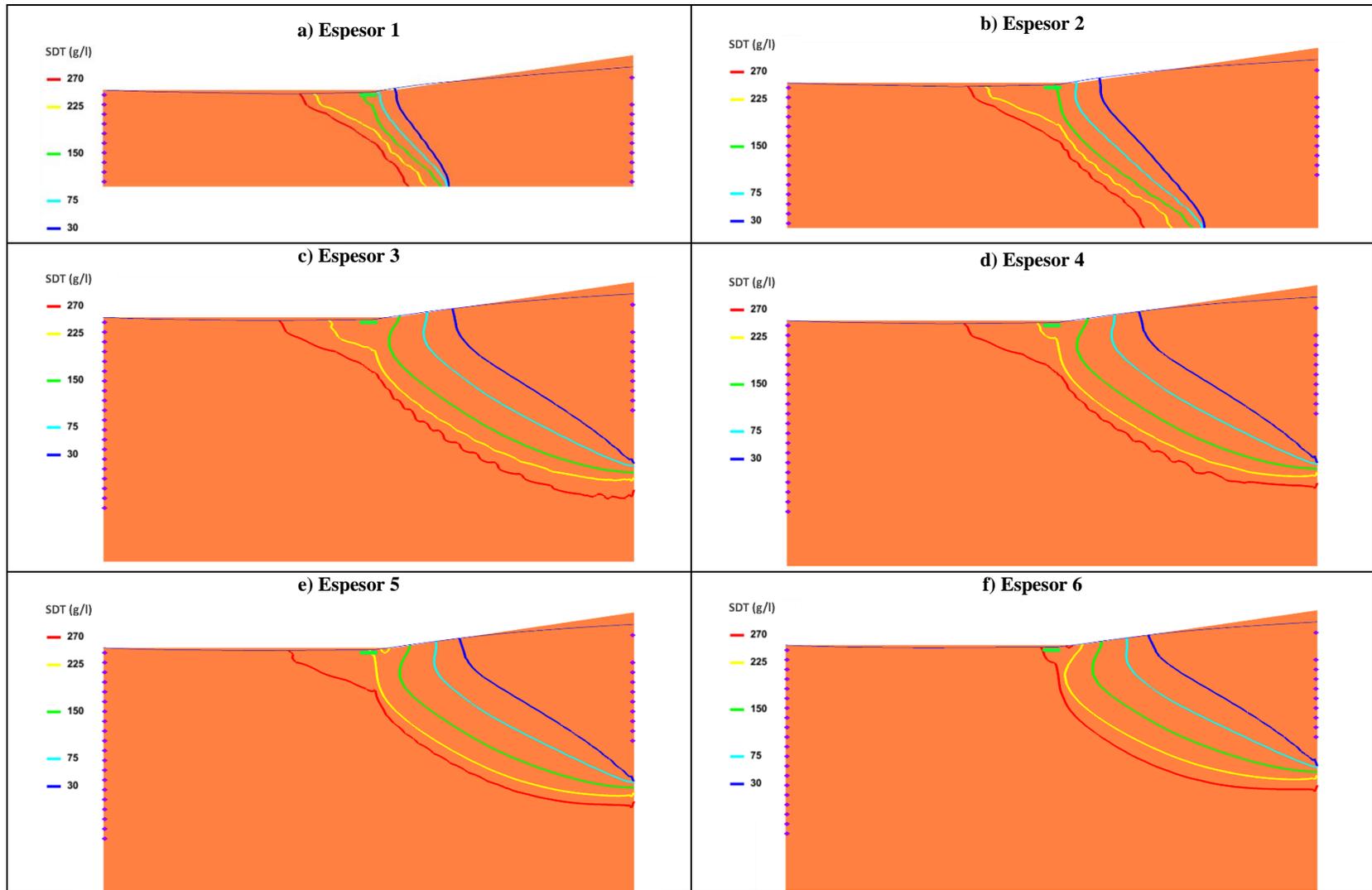
Además, en la Figura A-1 se muestran los perfiles de concentraciones en profundidad, siendo claro el efecto que tienen la profundidad de la condición de no flujo del fondo del modelo, lo cual se complementa con lo observado en la Figura A-2, donde para un espesor menor la interfaz se encuentra menos desarrollada y contenida, mientras que a medida que se desconecta del fondo y aumenta el espesor, las curvas de isoconcentraciones se vuelven suaves manteniendo a grandes rasgos la forma de la caña.

Figura A-1: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Efecto espesor del modelo



Fuente: Elaboración propia.

Figura A-2: Isolneas de concentración SDT (g/l) – Efecto espesor del modelo



a): Modelo considerando un espesor de 50 m de profundidad. b): Modelo considerando un espesor de 75 m de profundidad. c): Modelo considerando un espesor de 125 m de profundidad. d): Modelo considerando un espesor de 150 m de profundidad. e): Modelo considerando un espesor de 200 m de profundidad. f): Modelo considerando un espesor de 400 m de profundidad.

Fuente: Elaboración propia.

A.1.2. Discretización espacial horizontal

Como casos de evaluación, se consideraron valores de 20, 25, 75 y 100 m para la discretización horizontal del modelo (denominados Dh1, Dh2, Dh3 y Dh4 respectivamente) como se muestra en la Tabla A-4. Las zonas de evaporación y zonas de drenaje abarcan la misma extensión total que el modelo base I.

Tabla A-4: Casos de estudio - Efecto discretización horizontal

Modelo	Δx (m)	Δy (m)	$\Delta x : \Delta y$
Caso Base	50	5	10
Dh1	20	5	4
Dh2	25	5	5
Dh3	75	5	15
Dh4	100	5	20

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos (Tabla A-5), se tiene que para una discretización menor que el Caso Base existen concentraciones negativas para el soluto, por lo cual se evidencia un efecto de dispersión numérica en dichos casos.

Tabla A-5: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT - Efecto discretización horizontal

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m)	96.3	112.0	0.0	325.1
Dh1 ($\Delta x=20$ m ; $\Delta y=5$ m)	96.2	112.0	0.0	336.3
Dh2 ($\Delta x=25$ m ; $\Delta y=5$ m)	96.2	112.0	0.0	333.6
Dh3 ($\Delta x=75$ m ; $\Delta y=5$ m)	96.3	112.0	0.0	325.8
Dh4 ($\Delta x=100$ m ; $\Delta y=5$ m)	96.2	112.0	0.0	327.6

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los flujos a través de las condiciones de borde, en la Tabla A-6 se ve que no existe un efecto importante en los flujos netos para cada una de ellas.

Tabla A-6: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Efecto discretización horizontal

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m)	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Dh1 ($\Delta x=20$ m ; $\Delta y=5$ m)	0.065	0.152	-0.003	-0.099	-0.114
Dh2 ($\Delta x=25$ m ; $\Delta y=5$ m)	0.063	0.150	-0.003	-0.099	-0.111
Dh3 ($\Delta x=75$ m ; $\Delta y=5$ m)	0.063	0.151	-0.003	-0.101	-0.109
Dh4 ($\Delta x=100$ m ; $\Delta y=5$ m)	0.064	0.152	-0.003	-0.099	-0.114

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo (Tabla A-7), se tiene que el efecto de la discretización horizontal es casi despreciable, teniendo valores similares para los parámetros C_o , a y R_D .

Tabla A-7: Variables adimensionales de interés - Efecto discretización horizontal

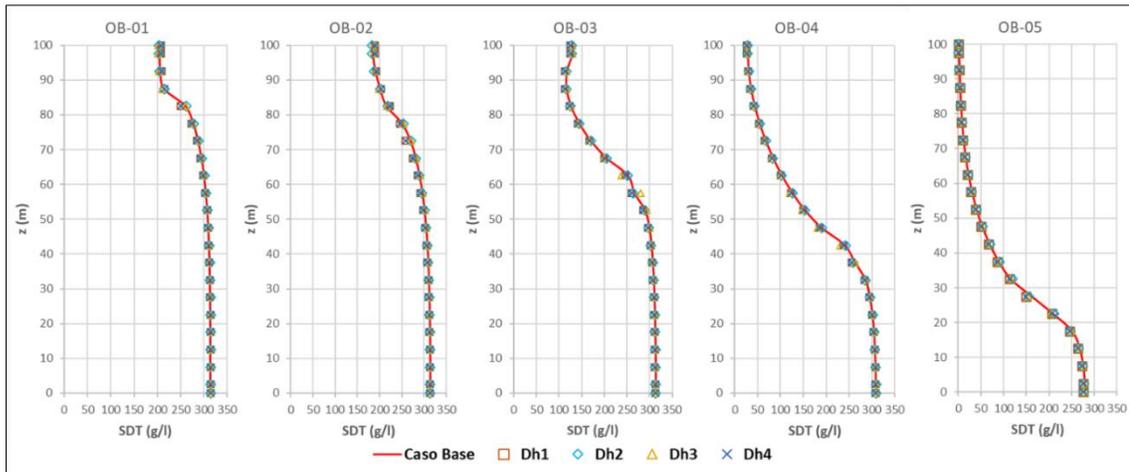
Modelo	Parámetro C_0	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m)	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
Dh1 ($\Delta x=20$ m ; $\Delta y=5$ m)	94.7	0.007	0.417	0.104	0.224	0.426	-0.016
Dh2 ($\Delta x=25$ m ; $\Delta y=5$ m)	95.6	0.006	0.415	0.091	0.223	0.419	-0.015
Dh3 ($\Delta x=75$ m ; $\Delta y=5$ m)	95.2	0.007	0.415	0.089	0.226	0.417	-0.015
Dh4 ($\Delta x=100$ m ; $\Delta y=5$ m)	94.2	0.007	0.416	0.080	0.211	0.417	-0.015

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, primero se ve en la Tabla A-7 que el desplazamiento es prácticamente nulo, como lo reflejan L_{D_s} y L_{D_i} . Además, el ancho medio de la interfaz salina se mantiene relativamente constante, al igual que la pendiente m_s .

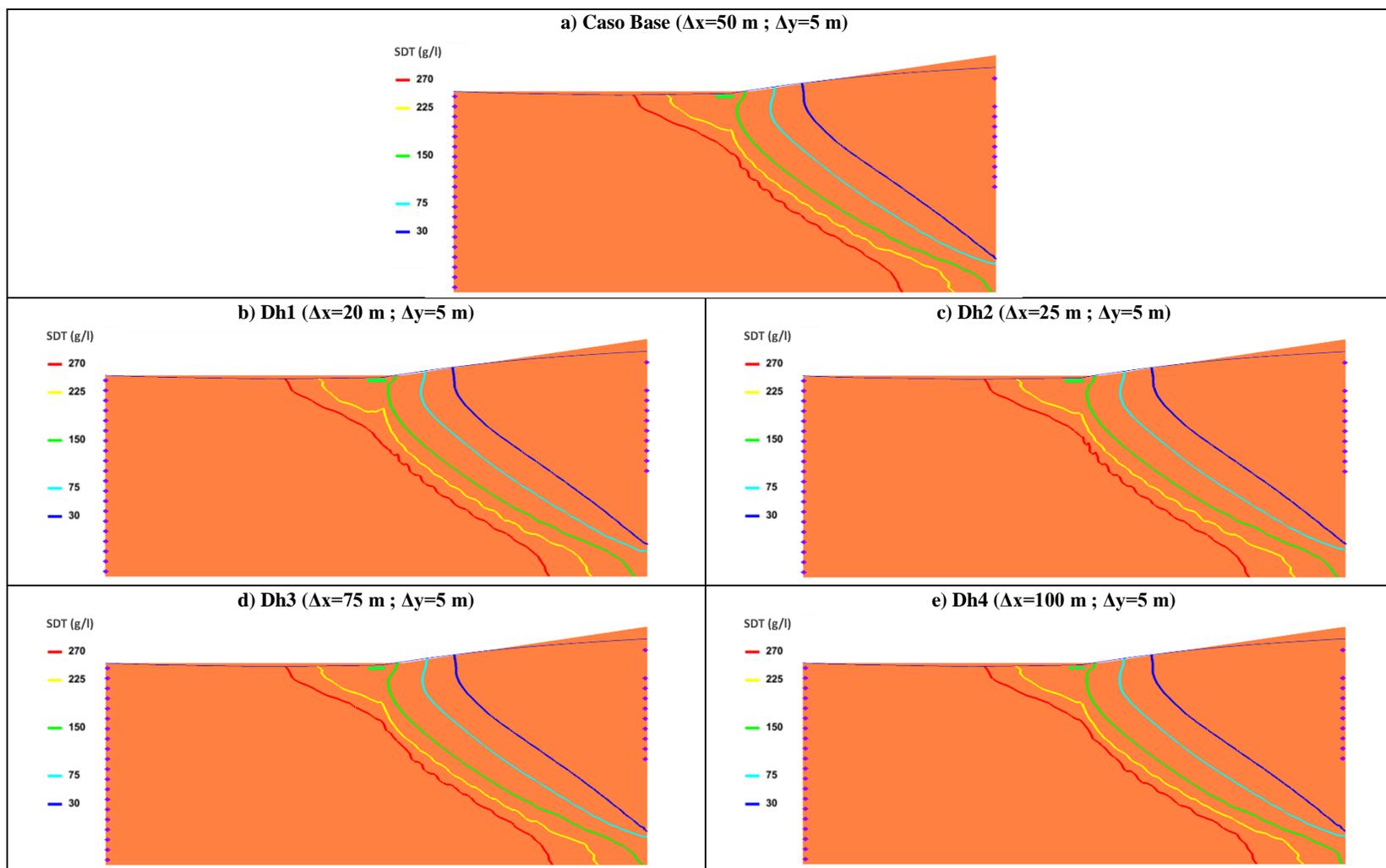
En la Figura A-3 y Figura A-4 se muestran los perfiles de concentraciones en profundidad para los pozos de observación y las líneas de isoconcentraciones respectivamente, siendo nulo efecto que tienen la discretización horizontal en la interfaz salina.

Figura A-3: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Efecto discretización horizontal



Fuente: Elaboración propia.

Figura A-4: Isolneas de concentración SDT (g/l) – Efecto discretización horizontal



- a): Modelo Caso Base con una discretización de $\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m. b): Modelo Dh1 con una discretización de $\Delta x=20$ m ; $\Delta y=5$ m.
c): Modelo Dh2 con una discretización de $\Delta x=25$ m ; $\Delta y=5$ m. d): Modelo Dh3 con una discretización de $\Delta x=75$ m ; $\Delta y=5$ m.
e): Modelo Dh4 con una discretización de $\Delta x=100$ m ; $\Delta y=5$ m.

Fuente: Elaboración propia.

A.1.3. Discretización espacial vertical

Como casos de evaluación, se consideraron valores de 1, 2, 2.5, 10 y 25 m para la discretización vertical del modelo (denominados Dv1, Dv2, Dv3, Dv4 y Dv5 respectivamente) teniendo el Caso Base una discretización de 5 m, como se muestra en la Tabla A-8. Además, las condiciones de borde mantienen la profundidad original impuesta, siendo de 100 m para la condición de Borde Salmuera y de 50 m para el Borde Agua Dulce.

Tabla A-8: Casos de estudio - Efecto discretización vertical

Modelo	Δx (m)	Δy (m)	$\Delta x : \Delta y$
Caso Base	50	5	10
Dv1	50	1	50
Dv2	50	2	25
Dv3	50	2.5	20
Dv4	50	10	5
Dv5	50	25	2

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar las simulaciones, se tiene que a medida que disminuye la discretización vertical, la discretización temporal disminuye también, aumentando considerablemente los tiempos de cálculo para esos casos, como también el requerir mayor cantidad de iteraciones para llegar al resultado. Además, cabe destacar que para el caso Dv5 no se logra un estado estacionario de la interfaz.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos (Tabla A-9), se tiene que para una discretización vertical mayor que del Caso Base, se obtienen concentraciones negativas para el soluto por lo cual existe un efecto de dispersión numérica en dichos casos.

Tabla A-9: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Efecto discretización vertical

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m)	96.3	112.0	0.0	325.1
Dv1 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=1$ m)	96.4	112.0	0.0	334.6
Dv2 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=2$ m)	96.2	112.0	0.0	333.2
Dv3 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=2.5$ m)	96.2	112.0	0.0	329.4
Dv4 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=10$ m)	96.3	112.0	0.0	322.6
Dv5 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=25$ m)	95.8	112.0	-0.1	315.0

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los flujos a través de las condiciones de borde, en la Tabla A-10 se ve que existe un aumento en los flujos de entrada por el Borde Salmuera y por el Borde Agua Dulce, pero también aumentando el flujo de salida por el drenaje.

Tabla A-10: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Efecto espesor del modelo

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m)	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Dv1 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=1$ m)	0.059	0.146	-0.003	-0.106	-0.096
Dv2 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=2$ m)	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.111
Dv3 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=2.5$ m)	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.111
Dv4 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=10$ m)	0.063	0.150	-0.003	-0.100	-0.110
Dv5 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=25$ m)	0.082	0.168	-0.003	-0.103	-0.143

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo (Tabla A-11), se tiene que para la discretización vertical 5 veces mayor que el Caso Base (modelo Dv5), el parámetro a y R_D alcanzan sus valores máximos mientras que Co su valor mínimo, aumentando los flujos de entrada por el Borde Agua Dulce y por el Borde Salmuera.

Tabla A-11: Variables adimensionales de interés - Efecto discretización vertical

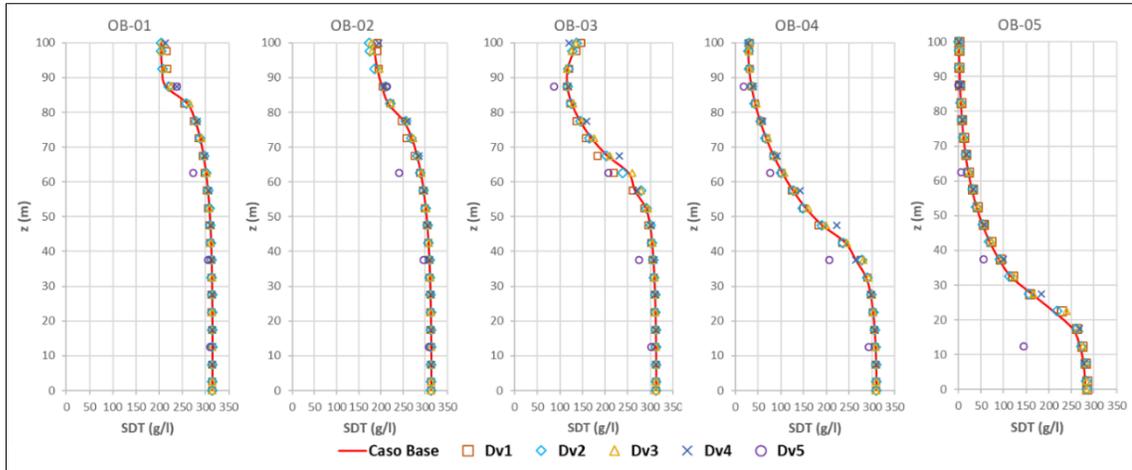
Modelo	Parámetro Co	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m)	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
Dv1 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=1$ m)	98.3	0.006	0.414	0.076	0.215	0.407	-0.015
Dv2 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=2$ m)	95.0	0.007	0.416	0.082	0.212	0.420	-0.015
Dv3 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=2.5$ m)	95.1	0.007	0.416	0.084	0.213	0.420	-0.016
Dv4 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=10$ m)	95.4	0.007	0.420	0.053	0.215	0.419	-0.015
Dv5 ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=25$ m)	85.7	0.007	0.483	0.259	0.338	0.487	-0.025

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, primero se ve en la Tabla A-11 que existe un desplazamiento de ésta para el modelo Dv5, puesto que las líneas de isoconcentraciones se desplaza alejándose del Borde de Agua Dulce, como lo reflejan L_{D_s} y L_{D_i} . Además, para dicho caso el ancho medio de la interfaz aumenta considerablemente al igual que la pendiente m_s teniendo un efecto importante la discretización vertical, lo cual se puede deber a la interpolación interna del programa teniendo menos información debido a la cantidad de celdas a medida que disminuye la discretización.

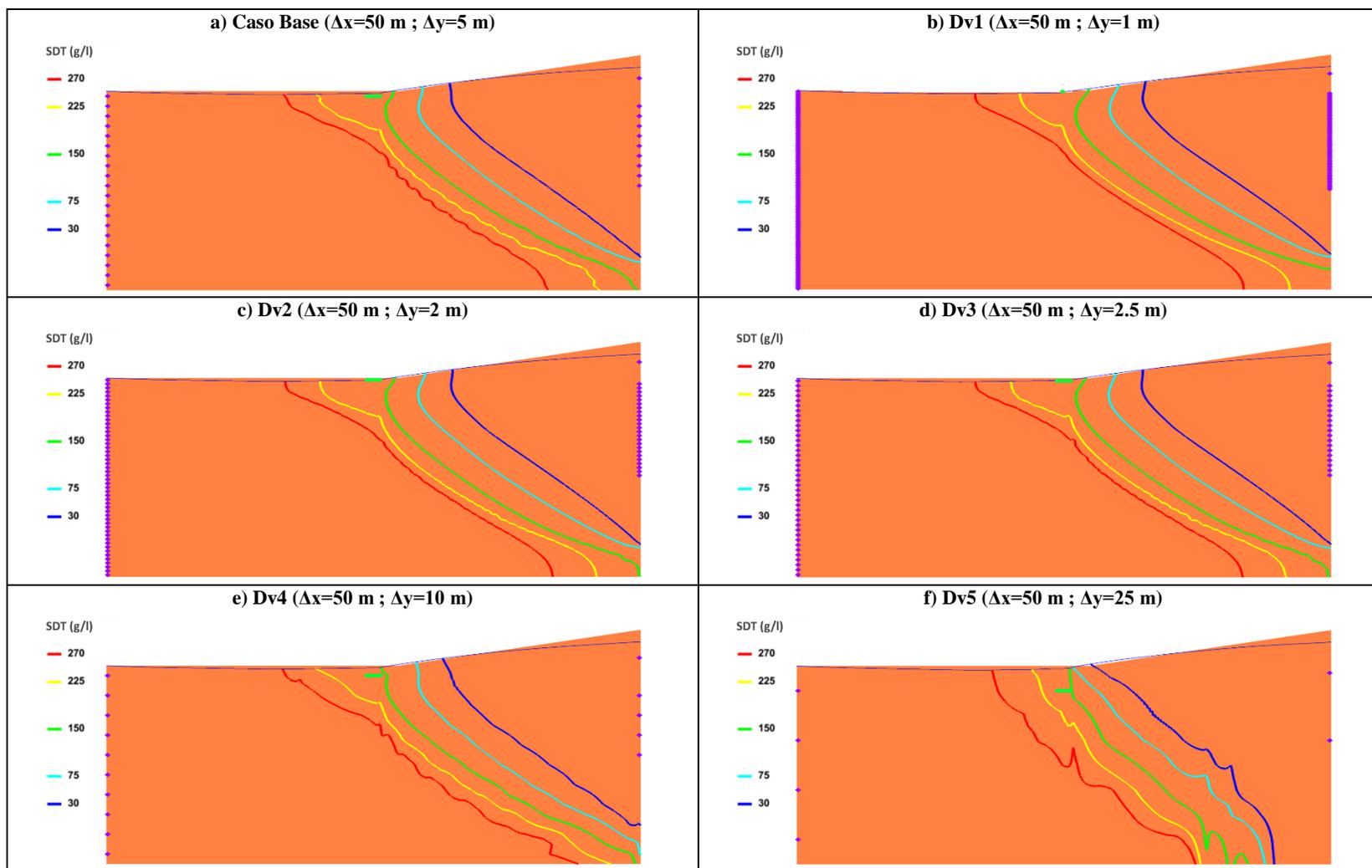
Además, en la Figura A-5 se muestran los perfiles de concentraciones en profundidad, existiendo un efecto importante cuando la discretización vertical es gruesa, generándose distorsiones en la distribución espacial de la concentración de soluto, observándose también en la Figura A-6.

Figura A-5: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Efecto discretización vertical



Fuente: Elaboración propia.

Figura A-6: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Efecto discretización vertical



a): Modelo Caso Base con una discretización de $\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m. b): Modelo Dv1 con una discretización de $\Delta x=50$ m ; $\Delta y=1$ m.
c): Modelo Dv2 con una discretización de $\Delta x=50$ m ; $\Delta y=2$ m. d): Modelo Dv3 con una discretización de $\Delta x=50$ m ; $\Delta y=2.5$ m.
e): Modelo Dv4 con una discretización de $\Delta x=50$ m ; $\Delta y=10$ m. f): Modelo Dv5 con una discretización de $\Delta x=50$ m ; $\Delta y=25$ m.

Fuente: Elaboración propia.

A.1.4. Refinamiento general de la grilla

Como casos de evaluación, se consideraron valores para la discretización horizontal y vertical como se muestra en la Tabla A-12, donde se mantiene constante la relación entre aquellas variables para los distintos casos.

Tabla A-12: Casos de estudio - Efecto refinamiento de grilla

Modelo	Δx (m)	Δy (m)	$\Delta x : \Delta y$
Caso Base	50	5	10
Grilla1	25	2,5	10
Grilla2	30	3	10
Grilla3	40	4	10
Grilla4	100	10	10

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos (Tabla A-13), se tiene que para una grilla más refinada que el Caso Base, se obtienen concentraciones negativas para el soluto por lo cual existe un leve efecto de dispersión numérica en dichos casos.

Tabla A-13: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Efecto refinamiento de grilla

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m)	96.3	112.0	0.0	325.1
Grilla 1 ($\Delta x=25$ m ; $\Delta y=2.5$ m)	96.2	112.0	0.0	336.4
Grilla 2 ($\Delta x=30$ m ; $\Delta y=3$ m)	96.2	112.0	0.0	333.7
Grilla 3 ($\Delta x=40$ m ; $\Delta y=4$ m)	96.2	112.0	0.0	326.8
Grilla 4 ($\Delta x=100$ m ; $\Delta y=10$ m)	96.2	112.0	0.0	323.2

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los flujos a través de las condiciones de borde, en la Tabla A-14 se ve que no existe un efecto importante al refinar la grilla.

Tabla A-14: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Efecto espesor del modelo

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m)	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Grilla 1 ($\Delta x=25$ m ; $\Delta y=2.5$ m)	0.065	0.152	-0.003	-0.098	-0.116
Grilla 2 ($\Delta x=30$ m ; $\Delta y=3$ m)	0.064	0.151	-0.003	-0.098	-0.113
Grilla 3 ($\Delta x=40$ m ; $\Delta y=4$ m)	0.064	0.151	-0.003	-0.099	-0.112
Grilla 4 ($\Delta x=100$ m ; $\Delta y=10$ m)	0.064	0.152	-0.003	-0.099	-0.113

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo (Tabla A-15), se tiene que el efecto de refinar la grilla es casi despreciable, teniendo valores similares para los parámetros C_0 , a y R_D .

Tabla A-15: Variables adimensionales de interés - Efecto refinamiento de grilla

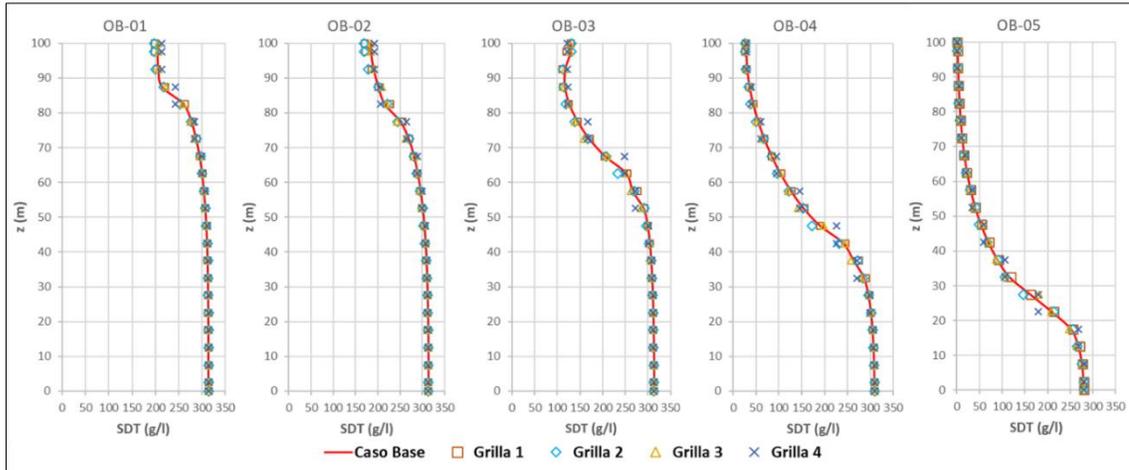
Modelo	Parámetro C_0	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base ($\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m)	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
Grilla 1 ($\Delta x=25$ m ; $\Delta y=2.5$ m)	94.6	0.007	0.419	0.101	0.220	0.431	-0.016
Grilla 2 ($\Delta x=30$ m ; $\Delta y=3$ m)	95.2	0.007	0.417	0.096	0.220	0.425	-0.015
Grilla 3 ($\Delta x=40$ m ; $\Delta y=4$ m)	95.0	0.007	0.416	0.088	0.213	0.421	-0.016
Grilla 4 ($\Delta x=100$ m ; $\Delta y=10$ m)	94.4	0.007	0.421	0.065	0.214	0.418	-0.016

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, primero se ve en la Tabla A-15 que el desplazamiento es prácticamente nulo, como lo reflejan L_{D_s} y L_{D_i} . Además, el ancho medio de la interfaz salina W_D se mantiene constante al igual que la pendiente m_s .

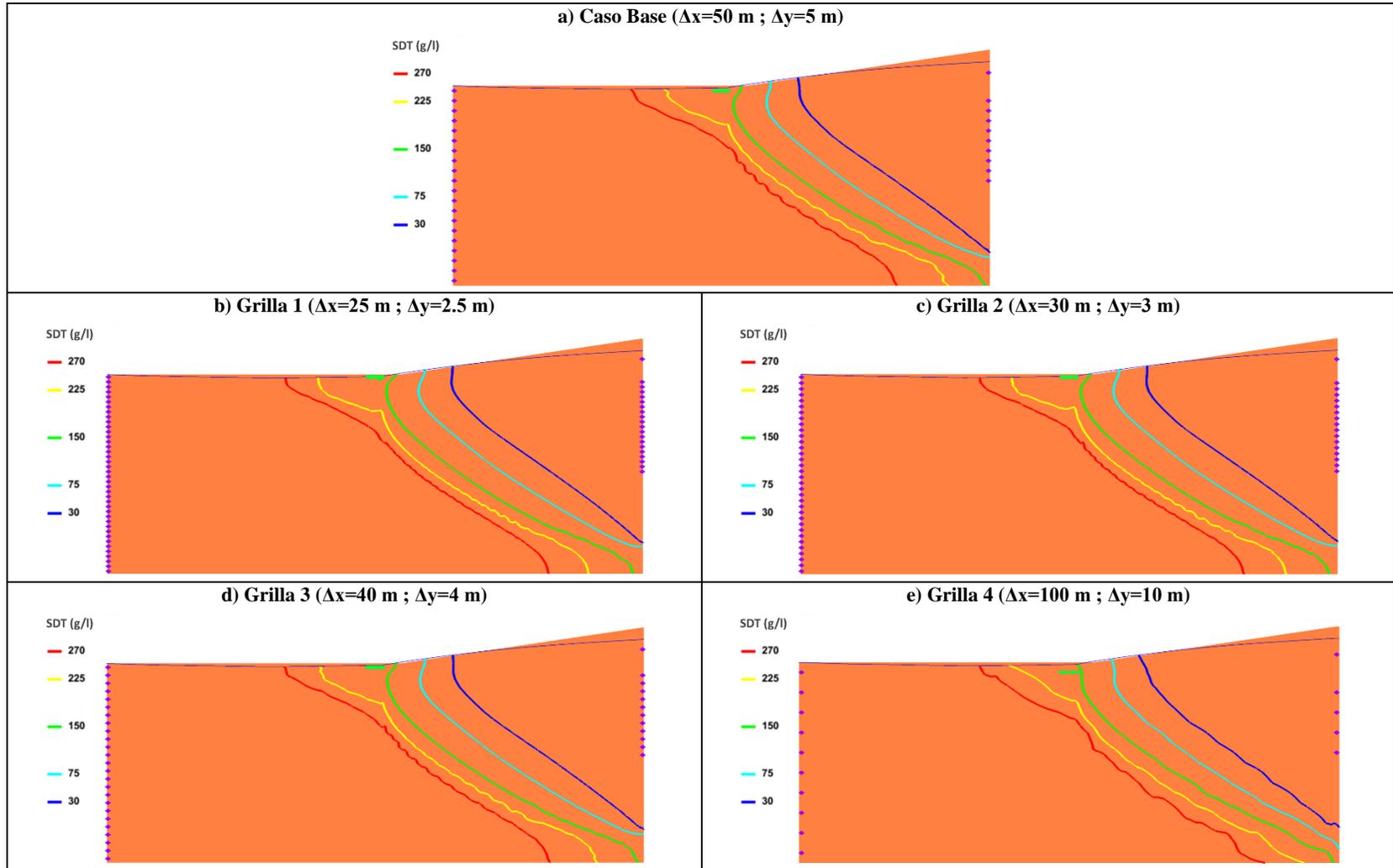
En el caso de los pozos de observación, en la Figura A-7 se muestran los perfiles de concentraciones en profundidad existiendo leves diferencias en el modelo Grilla 4, donde en las isóneas de concentración se producen irregularidades, como se muestra en la Figura A-8.

Figura A-7: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Efecto refinamiento de grilla



Fuente: Elaboración propia.

Figura A-8: Isolneas de concentración SDT (g/l) – Efecto refinamiento grilla



a): Modelo caso base con una discretización de $\Delta x=50$ m ; $\Delta y=5$ m. b): Modelo Grilla 1 con una discretización de $\Delta x=25$ m ; $\Delta y=2.5$ m.
c): Modelo Grilla 2 con una discretización de $\Delta x=30$ m ; $\Delta y=3$ m. d): Modelo Grilla 3 con una discretización de $\Delta x=40$ m ; $\Delta y=4$ m.
e): Modelo Grilla 4 con una discretización de $\Delta x=100$ m ; $\Delta y=10$ m.

Fuente: Elaboración propia.

A.2. Efectos de las condiciones de borde

Para evaluar los efectos de las condiciones de borde y de la configuración del código SEAWAT, se considerarán aspectos tales como imponer una densidad mínima y máxima del modelo, extensión de las condiciones de bordes de flujo y transporte, reemplazar la condición de borde de carga constante por una de flujo, entre otras a detallar más adelante, siendo el Caso Base los resultados correspondientes al modelo base I.

A.2.1. Densidad mínima y máxima

Como casos de evaluación, se impondrá una densidad mínima para el modelo de transporte equivalente al agua desde condición de Borde de Agua Dulce con un valor de 1,000 kg/m³. Mientras que como densidad máxima se impone una igual a la relacionada con la concentración del Borde Salmuera, con un valor de 1,200 kg/m³ para una concentración de SDT igual a 300 g/l, y otra de 1,220 kg/m³ asociada a la concentración máxima que se alcanza en el modelo base I con valor de 325 g/l, tal como se muestra en la Tabla A-16

Tabla A-16: Casos de estudio – Densidad mínima y máxima

Modelo	Densidad Mínima (kg/m ³)	Densidad Máxima (kg/m ³)
Caso Base	-	-
Min	1,000	-
Max1	-	1,200
Max2	-	1,220
MinMax1	1,000	1,200
MinMax2	1,000	1,220

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos mencionados anteriormente, en la Tabla A-17 se tiene que al acotar la densidad máxima por un valor igual al relacionado con concentración de la condición de borde (modelo Max1), la concentración que alcanzan el sistema es mayor que en el Caso Base, mientras que al considerar una densidad máxima relacionada a la concentración máxima de SDT que se alcanzan en el caso base (modelo Max2), no existe diferencia alguna para dichas variables.

Tabla A-17: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Densidad mínima y máxima

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base	96.3	112.0	0.0	325.1
Min	96.3	112.0	0.0	325.0
Max1	96.4	112.0	0.0	433.0
Max2	96.3	112.0	0.0	325.1
MinMax1	96.4	112.0	0.0	433.0
MinMax2	96.3	112.0	0.0	325.0

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los flujos a través de las condiciones de borde, en la Tabla A-18 se ve que un cambio en los modelos Max1 y MinMax1, disminuyendo las entradas por los Borde Salmuera y Agua Dulce, y aumentando la salida por el drenaje.

Tabla A-18: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Densidad mínima y máxima

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Min	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Max1	0.061	0.147	-0.007	-0.100	-0.102
Max2	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
MinMax1	0.061	0.147	-0.007	-0.100	-0.102
MinMax2	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo (Tabla A-19), se tiene que no existen diferencias significativas en los parámetros de análisis, cambiando solo cuando se limita la densidad por un máximo de 1,200 kg/m³ en los modelos Max1 y MinMax1.

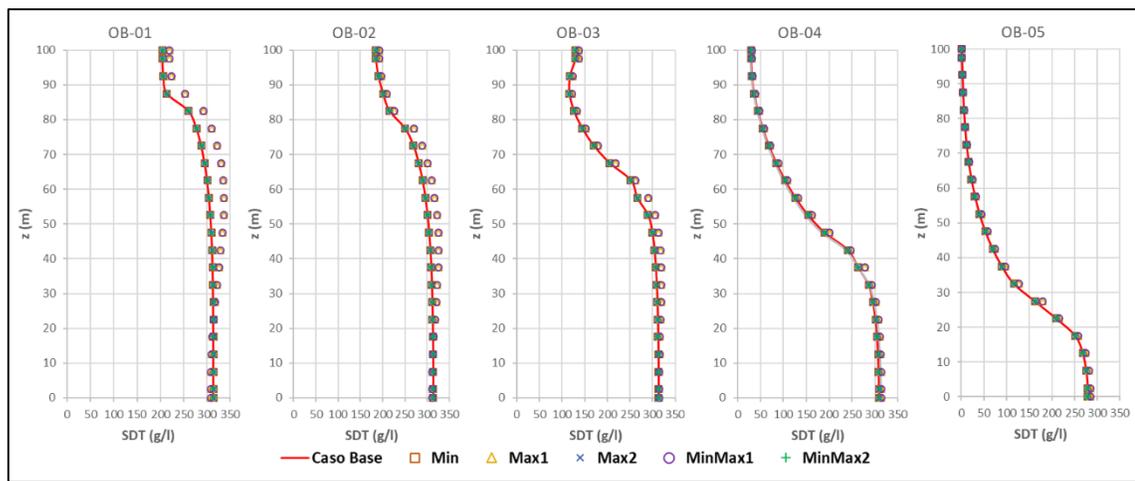
Tabla A-19: Variables adimensionales de interés – Densidad mínima y máxima

Modelo	Parámetro C_0	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
Min	95.3	0.007	0.416	0.076	0.208	0.419	-0.015
Max1	97.3	0.006	0.410	0.059	0.206	0.412	-0.015
Max2	95.3	0.007	0.416	0.076	0.208	0.419	-0.015
MinMax1	97.3	0.006	0.410	0.059	0.206	0.412	-0.015
MinMax2	95.3	0.007	0.416	0.076	0.208	0.419	-0.015

Fuente: Elaboración propia.

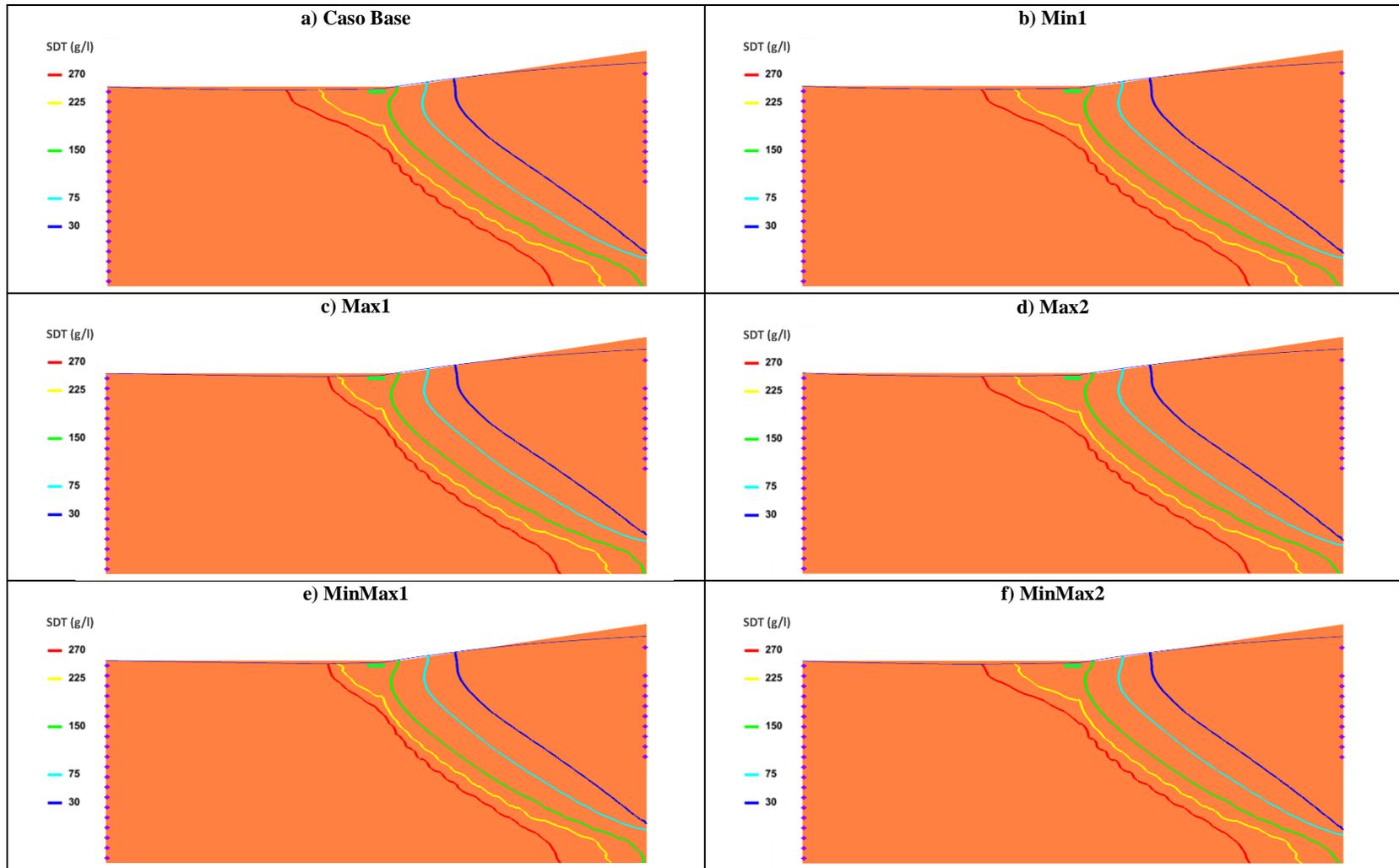
En el caso de la interfaz salina, primero se ve que en la Tabla A-19 que no existe diferencia en el desplazamiento de ésta ni en la forma, como lo reflejan W_D , m_s , L_{D_s} y L_{D_i} , aunque en la Figura A-9 se ve que en los pozos más cercanos a la condición de Borde de Salmuera existe un aumento de la concentración producto de limitar la densidad máxima en los modelos Max1 y MinMax1, reflejándose también en las isólinas de concentración en superficie cercanas al Borde Salar en la Figura A-10.

Figura A-9: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Densidad mínima y máxima



Fuente: Elaboración propia.

Figura A-10: Isolneas de concentración SDT (g/l) – Densidad mínima y máxima



- a): Modelo sin considerar límites en la densidad. b): Modelo considerando una densidad mínima de $1,000 \text{ kg/m}^3$.
c): Modelo considerando una densidad máxima de $1,200 \text{ kg/m}^3$. d): Modelo considerando una densidad máxima de $1,220 \text{ kg/m}^3$.
e): Modelo considerando una densidad mínima de $1,000 \text{ kg/m}^3$ y densidad máxima de $1,200 \text{ kg/m}^3$.
f): Modelo considerando una densidad mínima de $1,000 \text{ kg/m}^3$ y densidad máxima de $1,220 \text{ kg/m}^3$.

Fuente: Elaboración propia.

A.2.2. Extensión de condición de borde

Para evaluar el efecto de la extensión de la condición de borde de concentración y carga constante, se considerarán dos casos, evaluando tanto la extensión de concentración constante en el fondo del modelo en el Borde Salmuera, como también la extensión en el Borde de Agua Dulce.

- Extensión fondo Borde Salmuera

Para ello, y tal como se ha realizado en trabajos anteriores, se considera como condición de borde una concentración constante en el fondo del modelo igual al valor del Borde de Salmuera, representando las características del núcleo. Con esto, se considerarán los casos mencionados en la Tabla A-20.

Tabla A-20: Casos de estudio – Extensión fondo Borde Salmuera

Modelo	Extensión CB en fondo (m)	Concentración (g/l)
Caso Base	0	300
FondoSDT1	2,500	300
FondoSDT2	5,000	300
FondoSDT3	7,500	300
FondoSDT4	10,000	300

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los modelos mencionados anteriormente, en la Tabla A-21 se tiene que no existen diferencias importantes en dichas variables.

Tabla A-21: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión fondo Borde Salmuera

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base	96.3	112.0	0.0	325.1
FondoSDT1	96.4	112.0	0.0	324.6
FondoSDT2	96.5	112.0	0.0	325.5
FondoSDT3	95.9	112.0	0.0	324.9
FondoSDT4	95.2	112.0	0.0	326.9

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los flujos a través de las condiciones de borde, en la Tabla A-22 se ve que no existe un efecto importante en los flujos netos al modificar la condición de borde en el fondo del modelo.

Tabla A-22: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión fondo Borde Salmuera

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
FondoSDT1	0.066	0.153	-0.003	-0.101	-0.115
FondoSDT2	0.067	0.153	-0.003	-0.101	-0.116
FondoSDT3	0.066	0.153	-0.003	-0.101	-0.115
FondoSDT4	0.065	0.154	-0.003	-0.101	-0.114

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo (Tabla A-23), se tiene que tampoco existen diferencias significativas, teniendo valores similares para los parámetros Co , a y R_D .

Tabla A-23: Variables adimensionales de interés – Extensión fondo Borde Salmuera

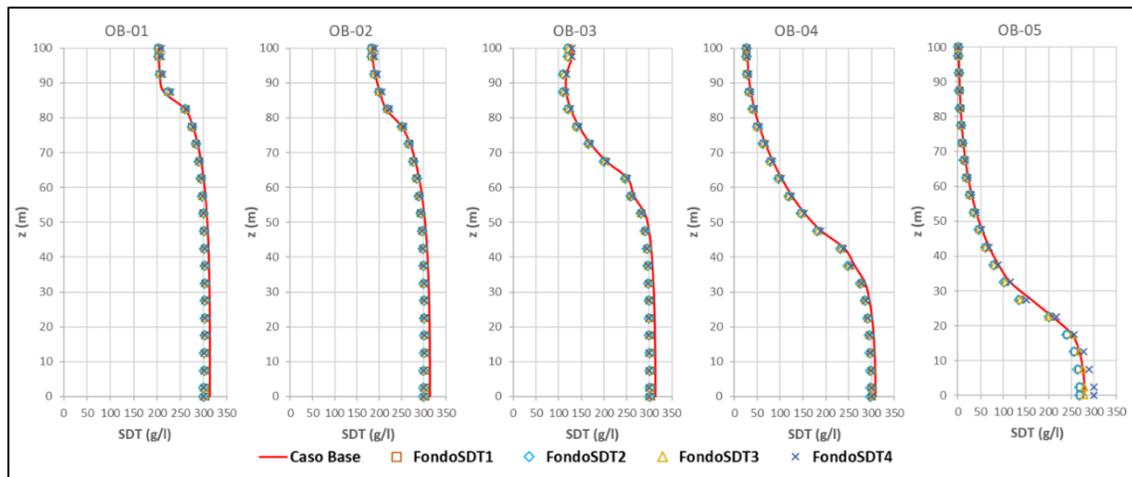
Modelo	Parámetro Co	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_t}	W_D	R_D	m_s
Caso Base	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
FondoSDT1	93.9	0.007	0.420	0.097	0.209	0.433	-0.016
FondoSDT2	93.6	0.007	0.422	0.100	0.209	0.435	-0.016
FondoSDT3	93.6	0.007	0.421	0.086	0.204	0.433	-0.016
FondoSDT4	93.2	0.007	0.416	0.000	0.189	0.419	-0.013

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, en la Tabla A-23 se muestra que en el modelo FondoSDT4 existe una desconexión de la interfaz salina con el fondo, como lo demuestra el valor nulo de L_{D_t} , donde en dicho caso el espesor W_D alcanza su valor mínimo siendo menor a 0.2, al igual que la pendiente m_s teniendo un valor de -0.013.

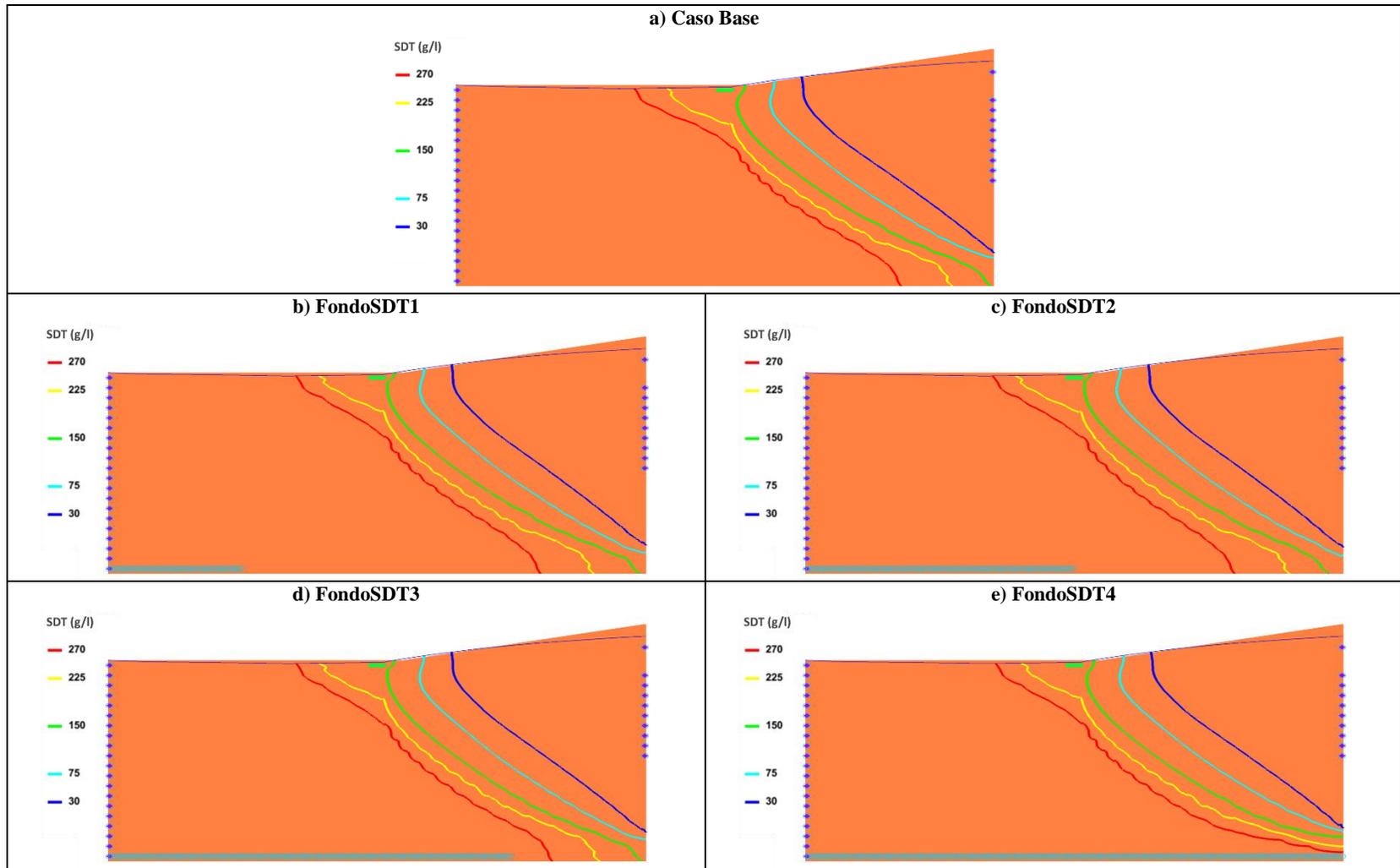
Además, en la Figura A-11 se muestran los perfiles de concentraciones en profundidad, donde existe un desplazamiento en profundidad de la interfaz acercándose al Borde Salmuera, menos en el OB-05 donde el efecto es diferenciado para cada caso, desconectándose del fondo como se muestra en la Figura A-12.

Figura A-11: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Extensión fondo Borde Salmuera



Fuente: Elaboración propia.

Figura A-12: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Extensión fondo Borde Salmuera



- a): Modelo sin condición de borde en el fondo. b): Modelo con concentración constante en el fondo de 300 g/l hasta los 2,500 m.
c): Modelo con concentración constante en el fondo de 300 g/l hasta los 5,000 m.
d): Modelo con concentración constante en el fondo de 300 g/l hasta los 7,500 m.
e): Modelo con concentración constante en el fondo de 300 g/l hasta los 10,000 m kg/m^3 .

Fuente: Elaboración propia.

- Extensión en Borde Agua Dulce

Para evaluar la extensión del Borde Agua Dulce, se considerará modelos con distinta profundidad de la condición de borde de recarga, manteniendo los valores tanto de la carga hidráulica como de la concentración del Caso Base, tal como se detalla en la Tabla A-24.

Tabla A-24: Casos de estudio – Extensión Borde Agua Dulce

Modelo	Extensión CB Recarga (m)	Concentración (g/l)	Carga Hidráulica (m)
Caso Base	50	0	112
Recarga20m	20	0	112
Recarga40m	40	0	112
Recarga60m	60	0	112
Recarga80m	80	0	112
Recarga100m	100	0	112

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los modelos mencionados anteriormente, en la Tabla A-25 se tiene que existen leves diferencias generándose valores negativos de concentración para una extensión menor que el Caso Base.

Tabla A-25: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Extensión Borde Agua Dulce

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base	96.3	112.0	0.0	325.1
Recarga20m	96.3	112.0	0.0	326.2
Recarga40m	96.3	112.0	0.0	325.7
Recarga60m	96.3	112.0	0.0	325.1
Recarga80m	96.2	112.0	0.0	324.8
Recarga100m	96.1	112.0	0.0	326.8

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los flujos a través de las condiciones de borde, en la Tabla A-26 se ve que no existe un efecto importante en los flujos netos al modificar la condición de borde en el fondo del modelo.

Tabla A-26: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Extensión Borde Agua Dulce

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Recarga20m	0.063	0.149	-0.003	-0.100	-0.109
Recarga40m	0.063	0.150	-0.003	-0.100	-0.110
Recarga60m	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Recarga80m	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.111
Recarga100m	0.065	0.151	-0.003	-0.101	-0.112

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo (Tabla A-27) se tiene que tampoco existen diferencias significativas teniendo valores similares para los parámetros a y R_D , aunque cabe destacar que existe un flujo de salida por el Borde Agua Dulce para el caso

Recarga100m, siendo el flujo neto por dicha condición de borde similar a los otros modelos. Además, y debido a que se reduce el espesor por donde ingresa el caudal de recarga de agua dulce, la velocidad de recarga aumenta por lo que el parámetro Co disminuye.

Tabla A-27: Variables adimensionales de interés – Extensión Borde Agua Dulce

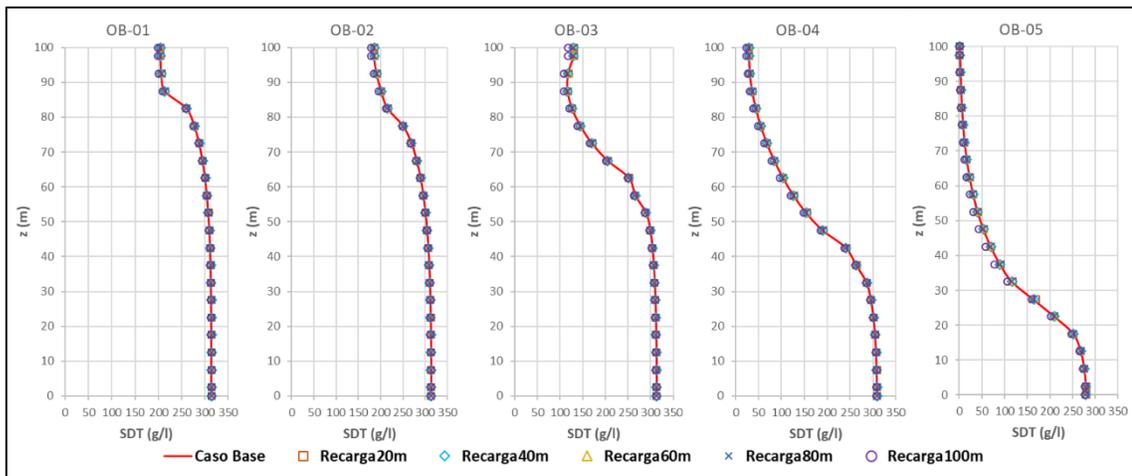
Modelo	Parámetro Co	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
Recarga20m	49.6	0.006	0.415	0.074	0.208	0.420	-0.015
Recarga40m	80.1	0.006	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
Recarga60m	110.6	0.007	0.416	0.077	0.208	0.419	-0.015
Recarga80m	141.3	0.007	0.416	0.077	0.207	0.419	-0.015
Recarga100m	156.5	0.007	0.424	0.093	0.188	0.394	-0.016

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, en la Tabla A-27 se muestra que no existe un desplazamiento ni modificación de ésta, como lo demuestran los valores de L_{D_s} , L_{D_i} y W_D .

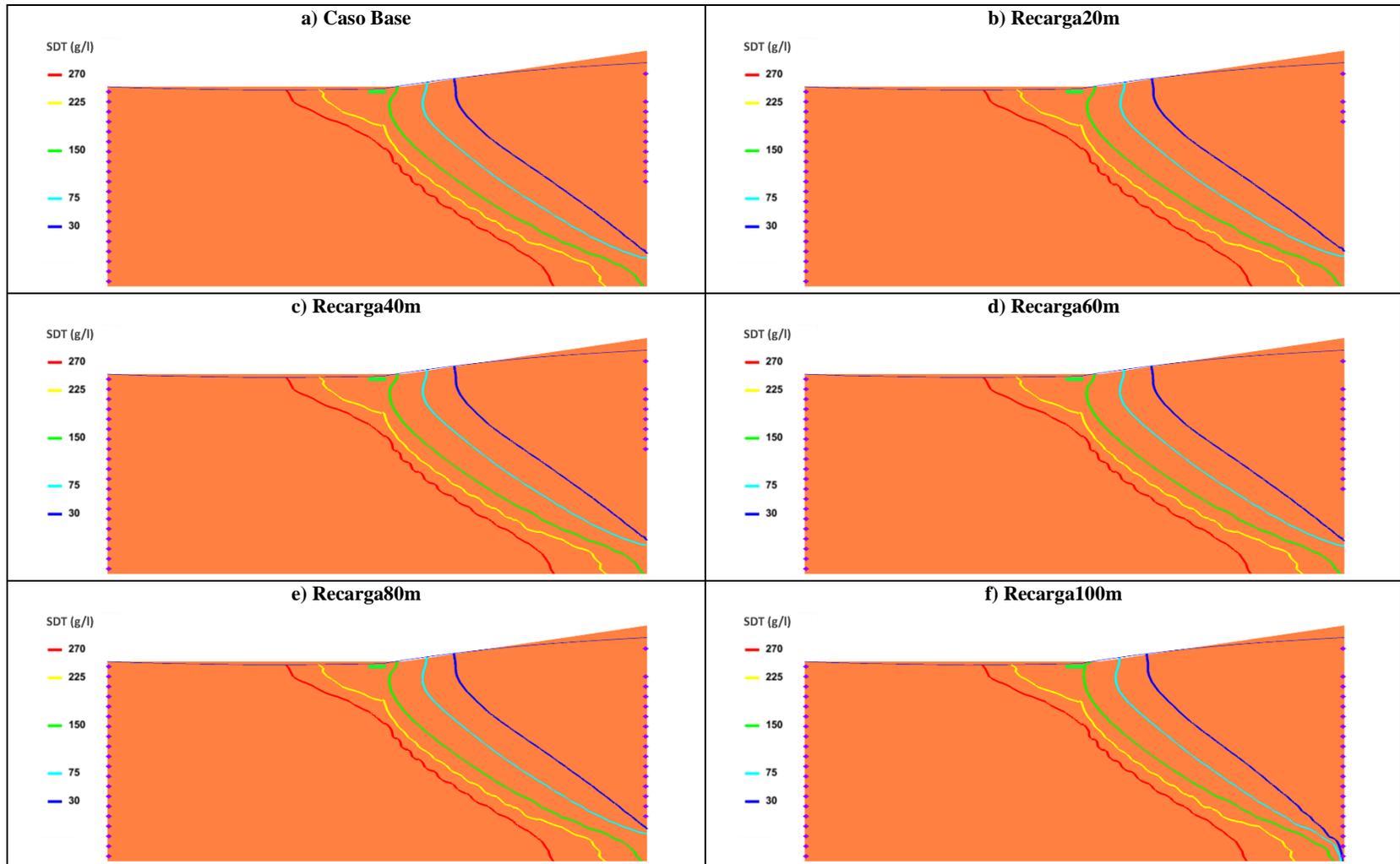
Además, en la Figura A-13 se muestran los perfiles de concentraciones en profundidad, donde se corrobora la nula modificación de la interfaz, al igual que en la Figura A-14 con las isolíneas de concentración.

Figura A-13: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Extensión Borde Agua Dulce



Fuente: Elaboración propia.

Figura A-14: Isolneas de concentración SDT (g/l) – Extensión Borde Agua Dulce



a): Modelo con extensión de Borde Recarga de 50 m. b): Modelo con extensión de Borde Recarga de 20 m.
c): Modelo con extensión de Borde Recarga de 40 m. d): Modelo con extensión de Borde Recarga de 60 m.
e): Modelo con extensión de Borde Recarga de 80 m. e): Modelo con extensión de Borde Recarga de 100 m.

Fuente: Elaboración propia

A.2.3. Considerar flujo en vez de carga constante en Borde Agua Dulce

Para reemplazar la condición de Borde de Agua Dulce, se considera un flujo de entrada impuesto por medio del paquete WELL de MODFLOW, manteniendo la misma extensión del modelo base I. Para los valores de entrada, se asume el resultado del modelo base I teniendo dos casos de evaluación, donde en uno se impone el resultado de flujo igual celda por celda, mientras que en otro se considera el flujo neto total dividido por la extensión del borde de recarga, tal como se resume en la Tabla A-28. Cabe destacar que, como condición de borde del modelo de transporte se asume una concentración de entrada de los pozos igual a 0 g/l, siendo la configuración por defecto.

Tabla A-28: Casos de estudio – Condición de flujo en Borde Agua Dulce

Modelo	Flujo de entrada por celda (m ³ /d)	Concentración de entrada(g/l)
Caso Base	-	-
Flujo1	38 - 215	0
Flujo2	65	0

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los modelos mencionados anteriormente, en la Tabla A-29 se tiene que no existen diferencias importantes en dichas variables, obteniendo prácticamente el mismo resultado.

Tabla A-29: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Condición de flujo en Borde Agua Dulce

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base	96.3	112.0	0.0	325.1
Flujo1	96.3	112.0	0.0	324.3
Flujo2	96.3	112.0	0.0	324.3

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los flujos a través de las condiciones de borde, en la Tabla A-30 se ve que no existe un efecto importante en los flujos netos al modificar la condición de borde en el fondo del modelo.

Tabla A-30: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Condición de flujo en Borde Agua Dulce

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Flujo1	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
Flujo2	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo (Tabla A-31) se tiene que tampoco existen diferencias significativas, teniendo los mismos valores para los parámetros C_0 , a y R_D .

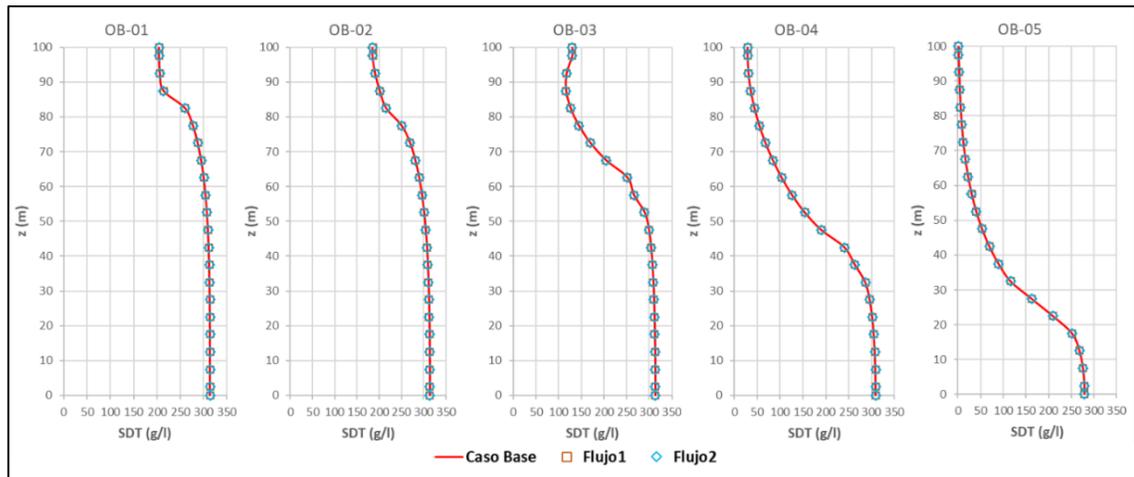
Tabla A-31: Variables adimensionales de interés – Condición de flujo en Borde Agua Dulce

Modelo	Parámetro C_0	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
Flujo1	95.3	0.007	0.415	0.077	0.208	0.419	-0.015
Flujo2	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015

Fuente: Elaboración propia.

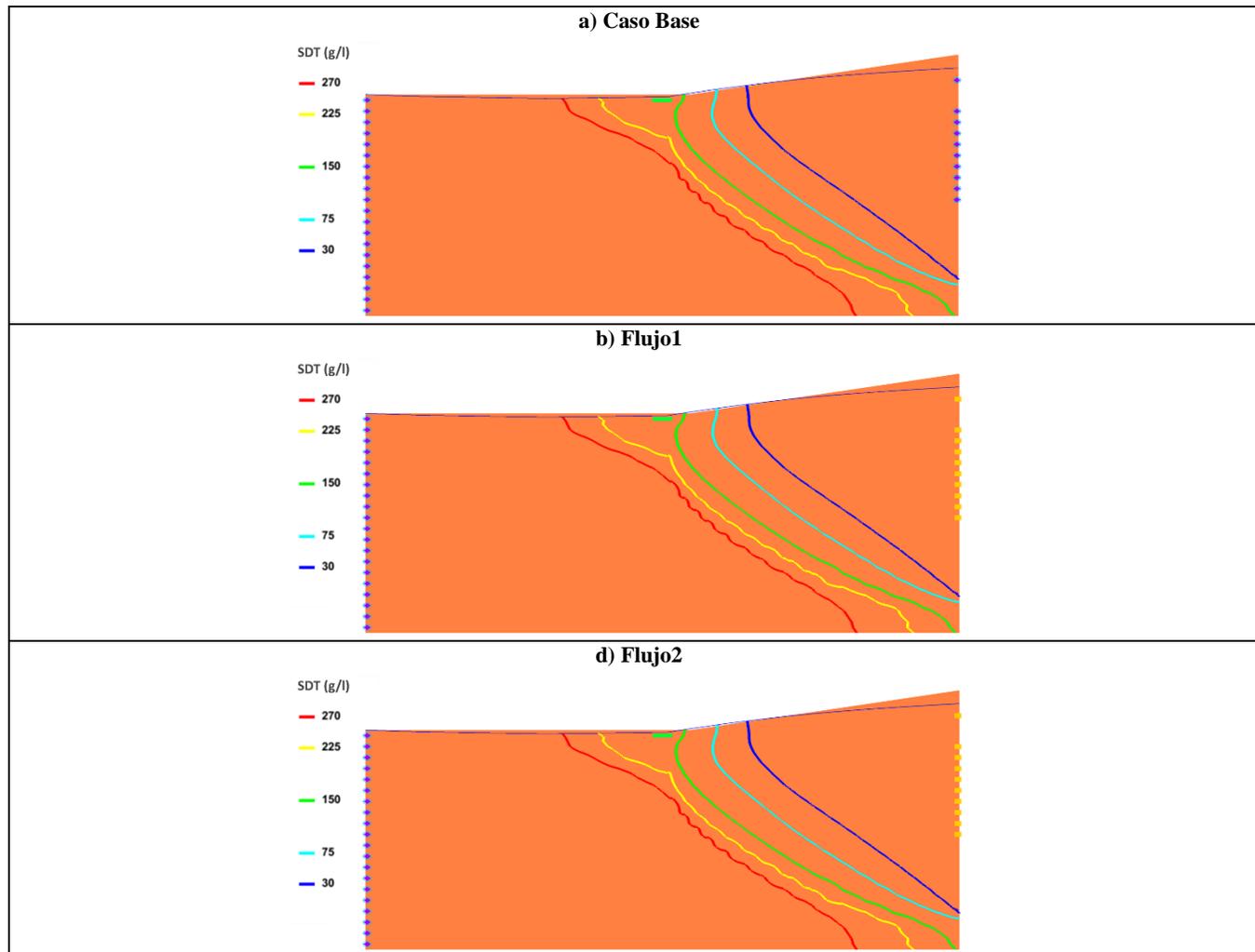
En el caso de la interfaz salina, en la Tabla A-31 se muestra que la interfaz no sufre modificaciones, teniendo los mismos valores para L_{D_s} , L_{D_i} , W_D y m_s . Además, en la Figura A-15 y Figura A-16 se muestran los perfiles en profundidad e isóneas de concentraciones, donde se corrobora la nula modificación de la interfaz salina.

Figura A-15: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Condición de flujo en Borde Agua Dulce



Fuente: Elaboración propia.

Figura A-16: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Condición de flujo en Borde Agua Dulce



- a): Modelo con condición de carga constante en Borde Agua Dulce.
b): Modelo con condición de flujo en Borde Agua Dulce diferenciado por celda.
c): Modelo con condición de flujo en Borde Agua Dulce iguales en cada celda.
Fuente: Elaboración propia.

A.2.4. Efecto concentración mínima en transporte

Dado que pueden generarse concentraciones negativas en el modelo de transporte careciendo de sentido físico, se evaluará el efecto de considerar una concentración mínima distinta de 0 g/l, tanto para la condición de Borde de Agua Dulce como para la concentración inicial homogénea del modelo. Además, se evaluará el modelo considerando como condición de borde en el lado de agua dulce tanto un flujo como una carga constante, estando los modelos resumidos en la Tabla A-32.

Tabla A-32: Casos de estudio – Concentración mínima en transporte

Modelo	Condición de Borde Recarga	Concentración inicial (g/l)	Concentración de entrada (g/l)
Caso Base	Carga constante	0	0
SDTmin1	Carga constante	0	5
SDTmin2	Carga constante	5	5
SDTmin3	Flujo constante	0	5
SDTmin4	Flujo constante	5	5

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los modelos mencionados anteriormente, en la Tabla A-33 se tiene que los niveles mínimos son prácticamente iguales en los 4 casos evaluados, además de ser el nivel piezométrico máximo menor que el Caso Base producto de la corrección que hace el código según la densidad. Además, y al comparar los casos con la misma condición de borde y distinta concentración inicial, se tiene que no existe un efecto al cambiar la concentración inicial. Por otro lado, existe una leve diferencia en la concentración mínima al comparar la condición de borde de carga constante y flujo constante, siendo menor a la concentración de entrada para el primer caso.

Tabla A-33: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Concentración mínima en transporte

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base	96.3	112.0	0.0	325.1
SDTmin1	96.3	112.0	5.0	326.3
SDTmin2	96.3	112.0	5.0	326.5
SDTmin3	96.3	111.9	5.0	324.1
SDTmin4	96.3	111.9	5.0	326.4

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los flujos a través de las condiciones de borde, en la Tabla A-34 se ve que no existe un efecto importante en los flujos netos al modificar la condición de borde en el fondo del modelo.

Tabla A-34: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Concentración mínima en transporte

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base	0.063	0.151	-0.003	-0.100	-0.110
SDTmin1	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
SDTmin2	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
SDTmin3	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
SDTmin4	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo Tabla A-35 se tiene que no existen diferencias entre los modelos con respecto al Caso Base, teniendo prácticamente los mismos valores para los parámetros Co , a y R_D .

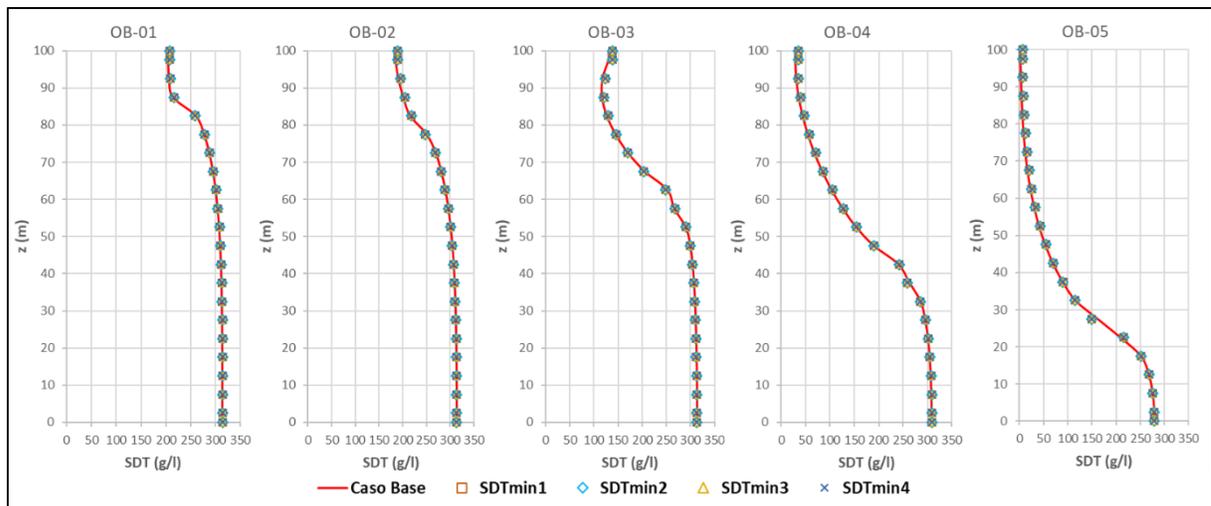
Tabla A-35: Variables adimensionales de interés – Concentración mínima en transporte

Modelo	Parámetro Co	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base	95.3	0.007	0.415	0.076	0.208	0.419	-0.015
SDTmin1	95.3	0.007	0.409	0.079	0.214	0.414	-0.015
SDTmin2	95.3	0.007	0.409	0.079	0.214	0.414	-0.015
SDTmin3	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
SDTmin4	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016

Fuente: Elaboración propia.

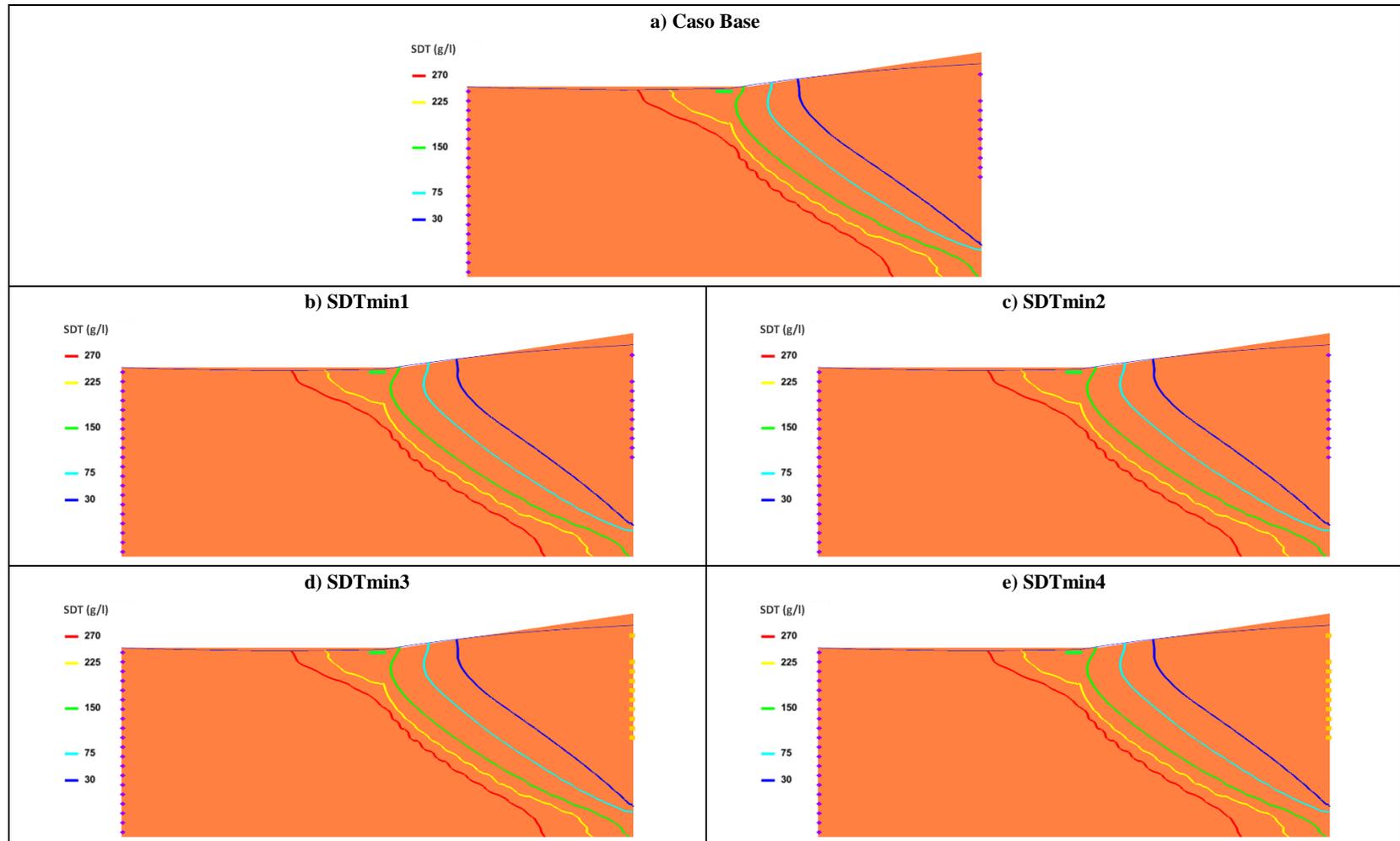
En el caso de la interfaz salina, en la Tabla A-35 se muestra que la interfaz tampoco sufre modificaciones, teniendo los mismos valores para L_{D_s} , L_{D_i} , W_D y m_s . Además, en la Figura A-17 y Figura A-18 se muestran los perfiles en profundidad e isóneas de concentraciones, donde se corrobora la nula modificación de la interfaz salina.

Figura A-17: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Concentración mínima en transporte



Fuente: Elaboración propia.

Figura A-18: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Concentración mínima en transporte



- a): Modelo con condición de carga constante con concentración de entrada de 0 g/l y concentración inicial de 0 g/l.
b): Modelo con condición de carga constante con concentración de entrada de 5 g/l y condición inicial de 0 g/l.
c): Modelo con condición de carga constante con concentración de entrada de 5 g/l y condición inicial de 5 g/l.
d): Modelo con condición de flujo constante con concentración de entrada de 5 g/l y condición inicial de 0 g/l.
e): Modelo con condición de flujo constante con concentración de entrada de 5 g/l y condición inicial de 5 g/l.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B. RESULTADOS PARA LOS DISTINTOS PARÁMETROS USADOS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y ESTUDIO DE LA INTERFAZ SALINA

B.1. Permeabilidad

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de permeabilidad, en la Tabla B-1 se tiene que al aumentar la permeabilidad los niveles piezométricos máximos se van reduciendo, lo cual es esperado debido la ecuación de Darcy. Mientras que a medida que la permeabilidad disminuye, se tiene que la concentración de SDT mínima y máxima alcanzan sus valores extremos.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo (Tabla B-2 y Tabla B-3), se tiene al aumentar la permeabilidad existe un aumento importante en la entrada desde Borde Salmuera, lo cual se refleja en el valor de R_D . Esto también se ve reflejado en los flujos de salida por la condición de dren, aumentando a medida que aumenta la permeabilidad, y en una reducción de los flujos de salida por la Zona de Evaporación 2 (lo cual se puede deber a una disminución de los niveles debido al aumento de la permeabilidad, y por ende alcanzando la profundidad de extinción.).

Tabla B-1: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz - Permeabilidad

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
Permeabilidad - Caso 1	95.1	126.0	4.4	341.5
Permeabilidad - Caso 2	95.7	116.5	4.6	334.5
Permeabilidad - Caso 3	96.1	113.5	4.7	329.1
Permeabilidad - Caso 4	96.4	110.8	5.0	324.9
Permeabilidad - Caso 5	96.5	110.0	5.0	320.6
Permeabilidad - Caso 6	96.7	108.8	5.0	318.1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-2: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz - Permeabilidad

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Permeabilidad - Caso 1	0.022	0.151	-0.002	-0.105	-0.066
Permeabilidad - Caso 2	0.037	0.151	-0.002	-0.103	-0.083
Permeabilidad - Caso 3	0.050	0.151	-0.003	-0.102	-0.097
Permeabilidad - Caso 4	0.076	0.151	-0.003	-0.087	-0.136
Permeabilidad - Caso 5	0.090	0.151	-0.004	-0.077	-0.160
Permeabilidad - Caso 6	0.114	0.151	-0.004	-0.061	-0.199

Fuente: Elaboración propia.

También se ve el efecto en los parámetros Co y α , donde existe una relación directa de la permeabilidad con la formulación de dichos parámetros, debido al efecto en los niveles piezométricos en el borde Agua Dulce lo cual afecta la velocidad de recarga.

Tabla B-3: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz - Permeabilidad

Modelo	Parámetro C_o	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Permeabilidad - Caso 1	29.2	0.026	0.478	0.312	0.175	0.148	-0.037
Permeabilidad - Caso 2	51.1	0.013	0.450	0.224	0.200	0.248	-0.025
Permeabilidad - Caso 3	73.2	0.009	0.427	0.144	0.203	0.334	-0.019
Permeabilidad - Caso 4	116.9	0.005	0.408	0.043	0.232	0.506	-0.011
Permeabilidad - Caso 5	138.4	0.004	0.409	0.000	0.216	0.595	-0.010
Permeabilidad - Caso 6	180.9	0.003	0.406	0.000	0.207	0.755	-0.008

Fuente: Elaboración propia.

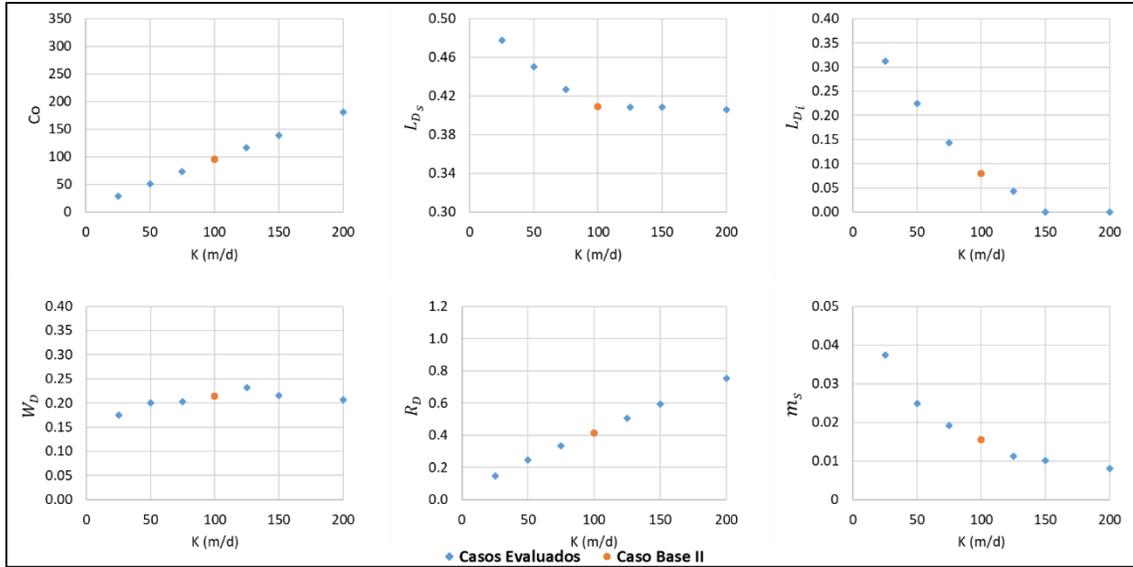
En el caso de la interfaz salina, primero se ve que en la Tabla B-3 existe una desconexión de la interfaz con el fondo a medida que aumenta la permeabilidad como lo refleja el valor nulo de L_{D_i} , además de un desplazamiento de L_{D_i} hacia el borde de agua dulce a medida que aumenta la permeabilidad. En el caso de la pendiente m_s , se tiene que a medida que aumenta la permeabilidad la pendiente disminuye, siendo la cuña salina más horizontal.

En la Figura B-1 se muestran los parámetros graficados con respecto a la permeabilidad, donde existe una tendencia creciente y lineal para los parámetros C_o y R_D , decreciente y estabilizándose para permeabilidades altas para los parámetros de forma de la interfaz dados por L_{D_s} , L_{D_i} y m_s , mientras que no existe una tendencia clara sobre el espesor W_D .

En la Figura B-2 se ve que existe un desplazamiento de la interfaz, donde en caso que la permeabilidad sea menor que el caso base la interfaz se acerca al Borde Salmuera, caso contrario que al ser mayor, donde la interfaz se acerca al Borde de Agua Dulce, lo cual da cuenta de un efecto en la distribución de SDT.

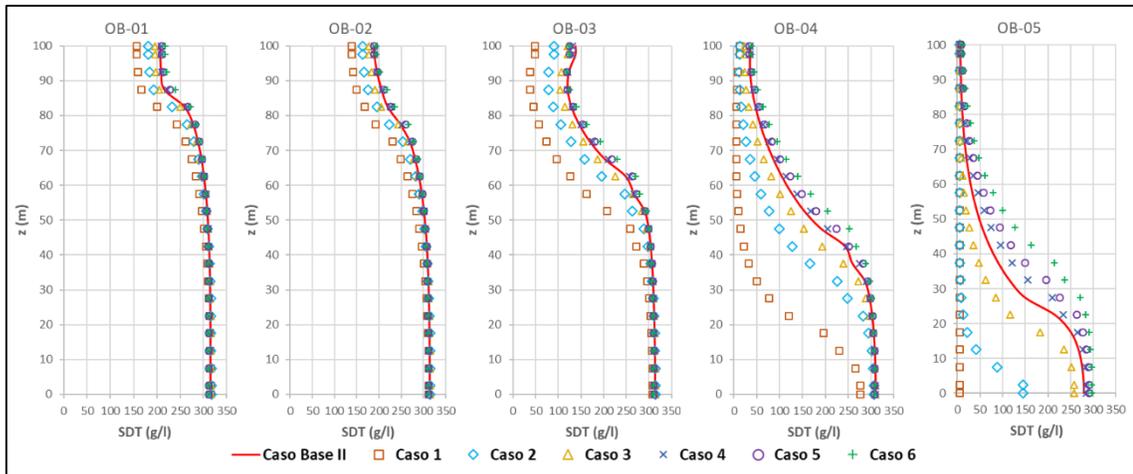
El desplazamiento de la interfaz salina puede deberse en parte a los niveles que se obtienen en el Borde Agua Dulce debido a la baja permeabilidad, como se muestra en la Figura B-3. Por otro lado, se nota un efecto de compresión de la interfaz salina, teniendo un efecto importante dicha variable en la configuración de la cuña salina, causando además de un desplazamiento, una modificación de esta.

Figura B-1: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Permeabilidad



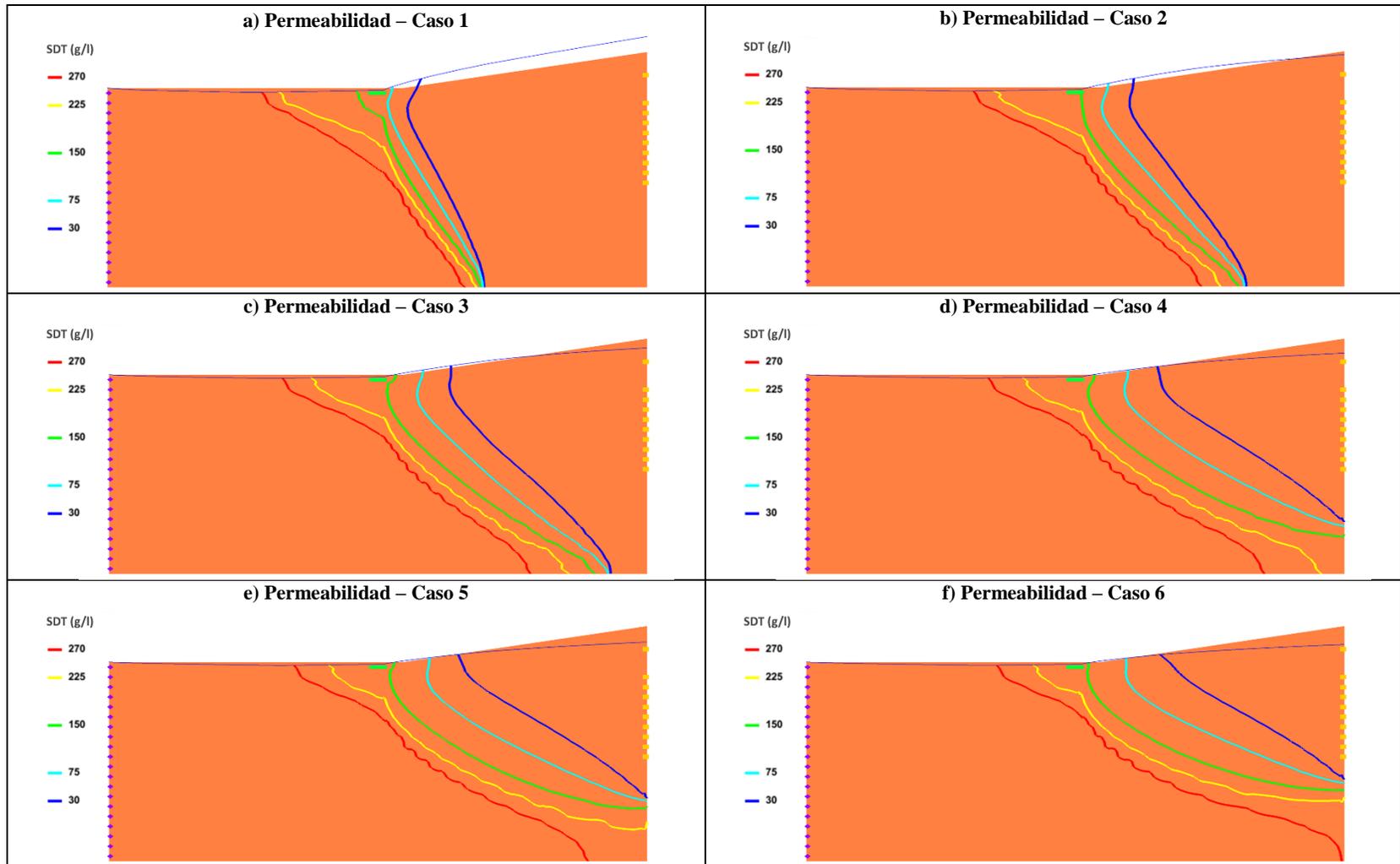
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-2: Concentración de SDT (g/l) en profundidad – Estudio de la interfaz - Permeabilidad



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-3: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz - Permeabilidad



a): Modelo considerando una permeabilidad de 25 m/d. b): Modelo considerando una permeabilidad de 50 m/d.
c): Modelo considerando una permeabilidad de 75 m/d. d): Modelo considerando una permeabilidad de 125 m/d.
e): Modelo considerando una permeabilidad de 150 m/d. f): Modelo considerando una permeabilidad de 200 m/d.

Fuente: Elaboración propia.

B.2. Flujo en Borde Agua Dulce

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de Flujo por el Borde Agua Dulce, en la Tabla B-4 se tiene que al aumentar el flujo los niveles piezométricos máximos van aumentando, lo cual es esperado debido a un ingreso mayor de agua; mientras que a medida que el flujo de entrada disminuye, se tiene que la concentración de SDT aumenta, lo cual se debe a que dicho borde no tiene la energía necesaria para desplazar a la interfaz salina.

Tabla B-4: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Flujo Borde Agua Dulce

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 1	97.0	106.3	21.9	330.2
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 2	96.8	108.9	5.0	330.3
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 3	96.5	110.6	5.0	331.5
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 4	96.0	113.1	4.7	325.7
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 5	95.8	114.3	4.8	325.3
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 6	95.5	116.9	4.4	324.2

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo en las Tabla B-5 y Tabla B-6, se tiene que al aumentar el flujo de entrada por el Borde Agua Dulce aumenta el flujo de entrada por el Borde Salmuera pero en una proporción menor que el primero como se aprecia en el parámetro R_D , puesto que existe un aumento en los flujos de salida por la condición de dren. También, el aumento en el flujo de entrada por el Borde Agua Dulce afecta los parámetros C_0 y α , debido a que su formulación está ligada a dicha variable.

Tabla B-5: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Flujo Borde Agua Dulce

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 1	0.045	0.038	-0.003	-0.018	-0.062
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 2	0.051	0.075	-0.003	-0.047	-0.076
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 3	0.057	0.113	-0.003	-0.075	-0.092
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 4	0.071	0.188	-0.003	-0.103	-0.152
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 5	0.077	0.226	-0.003	-0.105	-0.195
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 6	0.086	0.301	-0.003	-0.107	-0.278

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-6: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Flujo Borde Agua Dulce

Modelo	Parámetro C_o	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 1	346.1	0.002	0.314	0.000	0.381	1.193	-0.006
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 2	181.1	0.003	0.396	0.000	0.200	0.677	-0.008
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 3	124.2	0.005	0.398	0.003	0.226	0.505	-0.011
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 4	77.6	0.008	0.444	0.146	0.205	0.375	-0.018
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 5	65.9	0.010	0.471	0.201	0.202	0.340	-0.022
Flujo Borde Agua Dulce - Caso 6	51.4	0.013	0.485	0.265	0.146	0.287	-0.027

Fuente: Elaboración propia.

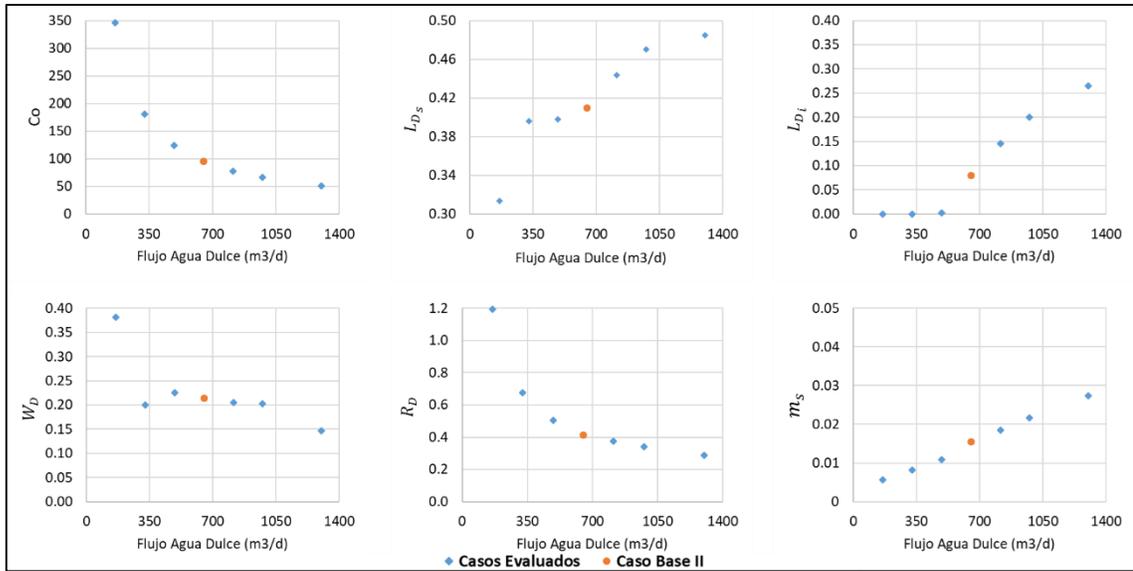
En el caso de la interfaz salina, primero se ve que en la Tabla B-6 existe una desconexión de la interfaz con el fondo del modelo a medida que disminuye el flujo de entrada por el Borde Agua Dulce, además de existir un desplazamiento hacia el Borde Salmuera a medida que aumenta la recarga, como lo reflejan los valores de L_{D_s} y L_{D_i} , además de disminuir el espesor cuando aumenta el flujo de entrada. Con respecto a la pendiente m_s , se tiene que aumenta a medida que aumenta la recarga por el Borde Agua Dulce debido al aumento de la energía y compresión de la interfaz salina, siendo la cuña salina más pronunciada.

En la Figura B-4 se muestran los parámetros graficados con respecto al flujo de agua dulce, donde existe una tendencia decreciente para los parámetros C_o , W_D y R_D , creciente para los parámetros de forma de la interfaz dados por L_{D_s} y L_{D_i} , mientras que es creciente y lineal para la pendiente m_s .

En la Figura B-5 se ve que existe un desplazamiento de la interfaz, donde en caso que la recarga sea menor que el caso base la interfaz se acerca al Borde Agua Dulce, mientras que al ser mayor el flujo de agua dulce la interfaz se acerca al Borde Salmuera.

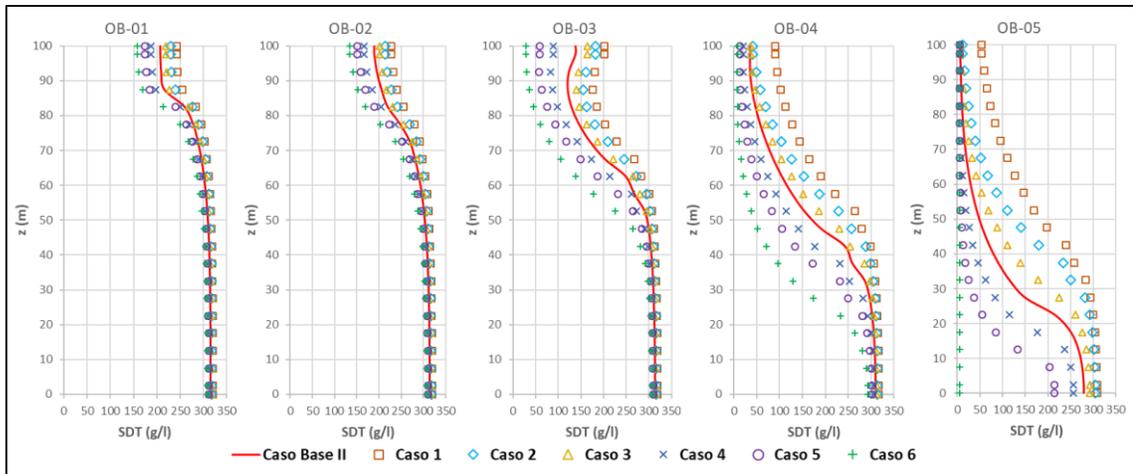
El desplazamiento de la interfaz salina puede deberse a la energía del flujo de entrada, como se muestra en la Figura B-6, donde a mayor flujo de entrada, existe un efecto de compresión de la interfaz salina y desplazamiento de ésta, teniendo un efecto importante dicha variable en la configuración de la cuña salina, siendo similar el efecto que la permeabilidad.

Figura B-4: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Flujo Borde Agua Dulce



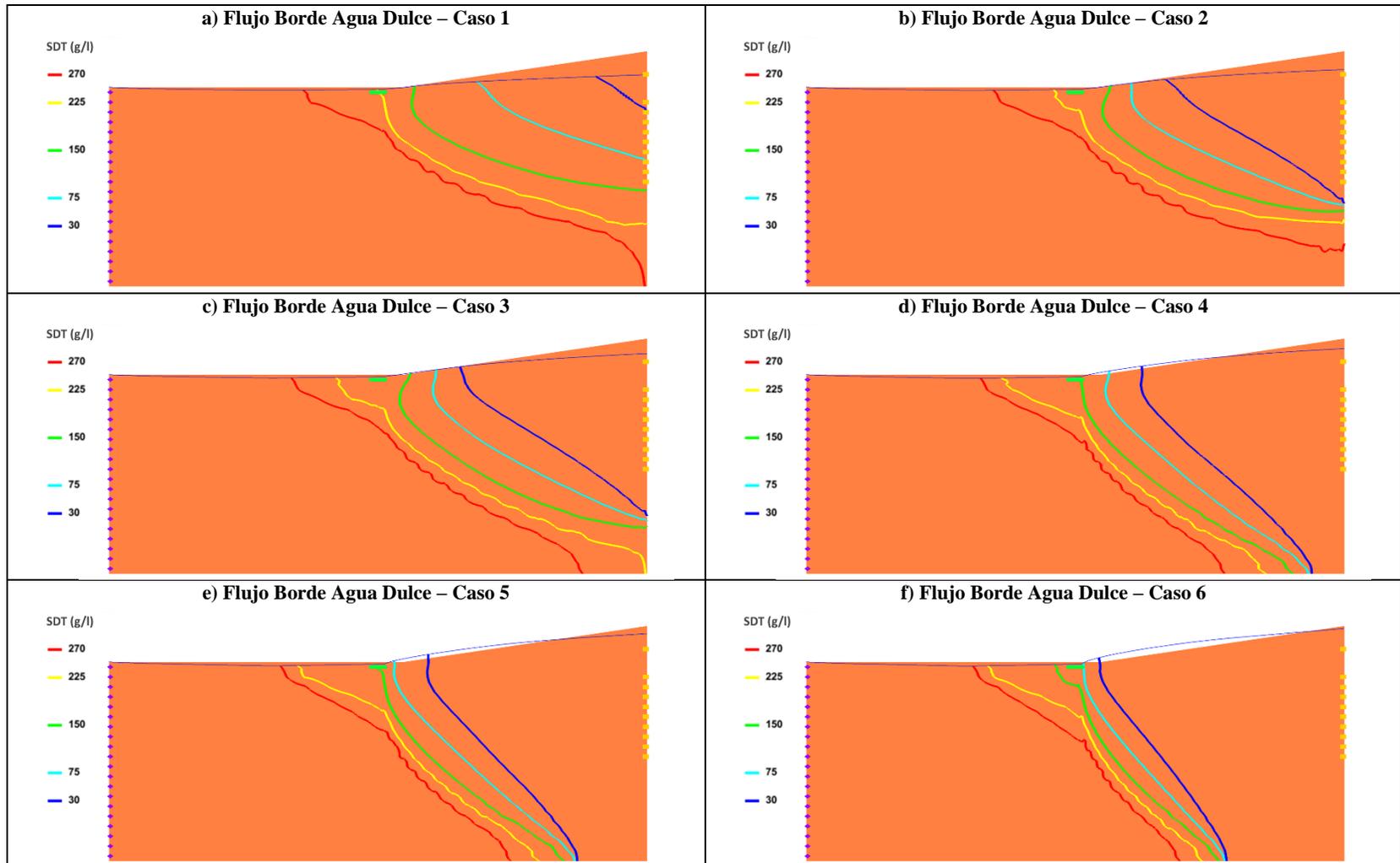
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-5: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Flujo Borde Agua Dulce



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-6: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz - Flujo Borde Agua Dulce



a): Modelo con flujo de entrada por Borde Agua Dulce de 162.66 m³/d. b): Modelo con flujo de entrada por Borde Agua Dulce de 325.32 m³/d.
c): Modelo con flujo de entrada por Borde Agua Dulce de 487.99 m³/d.d): Modelo con flujo de entrada por Borde Agua Dulce de 813.31 m³/d.
e): Modelo con flujo de entrada por Borde Agua Dulce de 975.97 m³/d. f): Modelo con flujo de entrada por Borde Agua Dulce de 1,301.30 m³/d.

Fuente: Elaboración propia.

B.3. Dispersividad Longitudinal

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de dispersividad longitudinal (donde se mantiene la dispersividad vertical del Caso Base II con un valor de 0.25 m), en la Tabla B-7 se ve que el efecto es mínimo en dichas variables, sin tener una tendencia clara.

Tabla B-7: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
Dispersividad Longitudinal - Caso 1	96.3	111.9	5.0	325.0
Dispersividad Longitudinal - Caso 2	96.3	111.9	5.0	323.3
Dispersividad Longitudinal - Caso 3	96.3	111.9	5.0	325.8
Dispersividad Longitudinal - Caso 4	96.3	111.9	5.0	328.0
Dispersividad Longitudinal - Caso 5	96.3	111.8	5.0	328.1
Dispersividad Longitudinal - Caso 6	96.2	111.7	5.0	330.8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-8: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Dispersividad Longitudinal - Caso 1	0.059	0.151	-0.003	-0.100	-0.107
Dispersividad Longitudinal - Caso 2	0.060	0.151	-0.003	-0.100	-0.108
Dispersividad Longitudinal - Caso 3	0.061	0.151	-0.003	-0.099	-0.109
Dispersividad Longitudinal - Caso 4	0.063	0.151	-0.003	-0.099	-0.112
Dispersividad Longitudinal - Caso 5	0.064	0.151	-0.003	-0.099	-0.113
Dispersividad Longitudinal - Caso 6	0.069	0.151	-0.003	-0.099	-0.118

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo en las Tabla B-8 y Tabla B-9, se tiene que al aumentar la dispersividad longitudinal aumenta levemente la entrada a través del Borde Salmuera, lo cual se aprecia en el parámetro R_D , además de existir un aumento de las salidas por la condición de dren. Por otro lado, los parámetros C_0 y α no presentan variaciones significativas al modificar la dispersividad longitudinal.

Tabla B-9: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal

Modelo	Parámetro C_o	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Dispersividad Longitudinal - Caso 1	95.2	0.007	0.409	0.035	0.204	0.395	-0.014
Dispersividad Longitudinal - Caso 2	95.2	0.007	0.409	0.058	0.209	0.401	-0.015
Dispersividad Longitudinal - Caso 3	95.2	0.007	0.409	0.070	0.213	0.407	-0.015
Dispersividad Longitudinal - Caso 4	95.1	0.007	0.410	0.092	0.220	0.420	-0.016
Dispersividad Longitudinal - Caso 5	95.0	0.007	0.410	0.108	0.234	0.427	-0.016
Dispersividad Longitudinal - Caso 6	94.8	0.007	0.415	0.134	0.245	0.460	-0.016

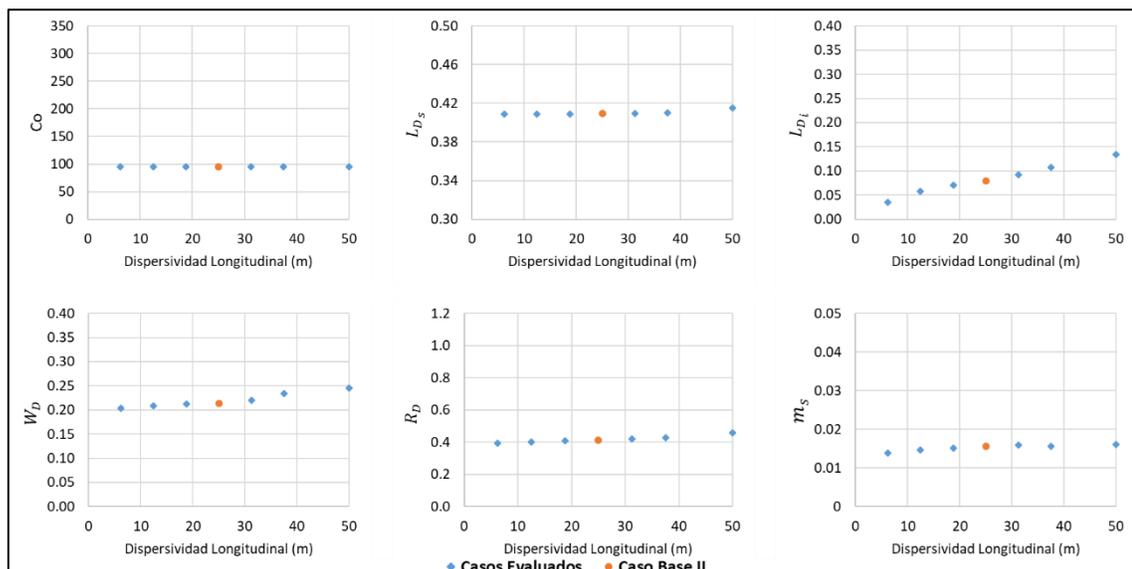
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, primero se ve que en la Tabla B-9 existe un leve desplazamiento de la interfaz salina producto del aumento de la dispersividad longitudinal, como lo reflejan los valores de L_{D_s} y L_{D_i} , siendo más importante el efecto en la zona inferior. Además, se tiene un aumento del espesor dado por W_D . Con respecto a la pendiente de la interfaz m_s , se tiene que aumenta levemente al aumentar la dispersividad.

En la Figura B-7 se muestran los parámetros graficados con respecto a la dispersividad longitudinal, donde existe un nulo efecto sobre C_o , una leve tendencia creciente para los parámetros R_D , m_s , L_{D_s} y W_D , mientras que es creciente y lineal para el parámetro L_{D_i} .

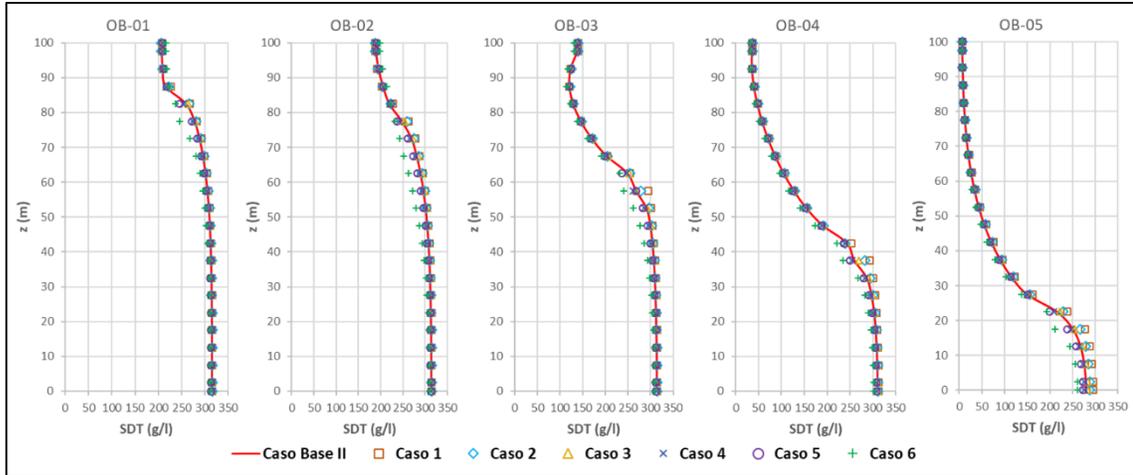
También, en la Figura B-8 se ve que existe un desplazamiento de la interfaz, aunque con mayor importancia en profundidad y más cercano al Borde Agua Dulce. Lo anterior se corrobora en la Figura B-9, donde la interfaz salina se va expandiendo en profundidad para valores altos de la dispersividad, pero manteniendo la forma general.

Figura B-7: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal



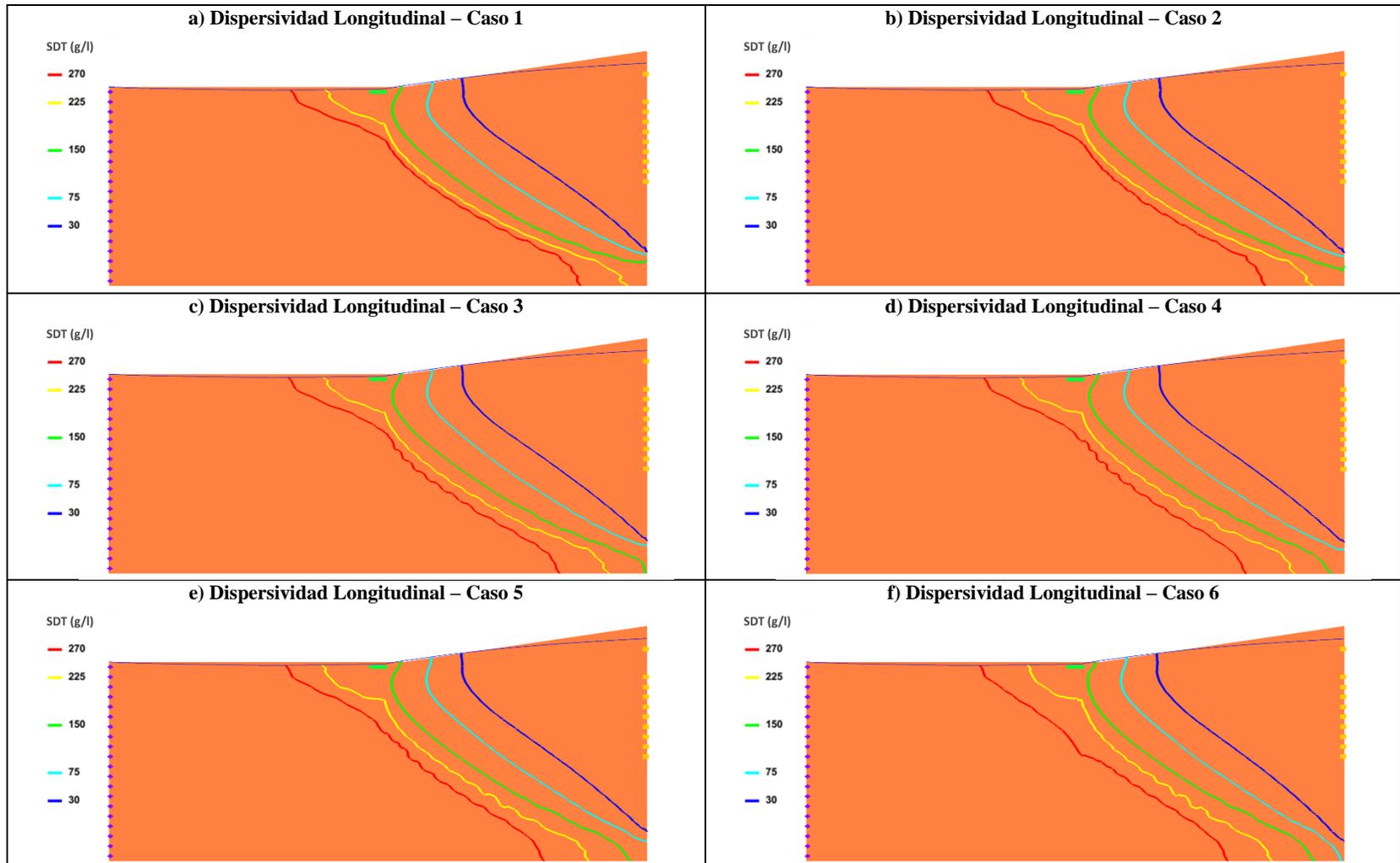
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-8: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-9: Isolneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz - Dispersividad Longitudinal



a): Modelo considerando una dispersividad longitudinal de 6.25 m. b): Modelo considerando una dispersividad longitudinal de 12.5 m.
c): Modelo considerando una dispersividad longitudinal de 18.75 m. d): Modelo considerando una dispersividad longitudinal de 31.25 m.
e): Modelo considerando una dispersividad longitudinal de 37.5 m. f): Modelo considerando una dispersividad longitudinal de 50 m.

Fuente: Elaboración propia.

B.4. Dispersividad Vertical

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de dispersividad vertical (donde se mantiene la dispersividad longitudinal del Caso Base II con un valor de 25 m), en la Tabla B-10 se ve que no existe un efecto importante en los niveles piezométricos pero sí en la concentración máxima de SDT, donde a medida que aumenta la dispersividad vertical disminuye la concentración máxima, lo cual se debe a un mayor desplazamiento vertical y por ende, mayor mezcla en dicha dirección.

Tabla B-10: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Dispersividad Vertical

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
Dispersividad Vertical - Caso 1	96.7	112.1	5.0	331.4
Dispersividad Vertical - Caso 2	96.4	112.0	5.0	330.1
Dispersividad Vertical - Caso 3	96.3	112.0	5.0	331.2
Dispersividad Vertical - Caso 4	96.3	111.8	5.0	325.1
Dispersividad Vertical - Caso 5	96.3	111.8	5.0	323.4
Dispersividad Vertical - Caso 6	96.4	111.7	5.0	322.4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-11: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Dispersividad Vertical

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Dispersividad Vertical - Caso 1	0.046	0.151	-0.003	-0.102	-0.092
Dispersividad Vertical - Caso 2	0.053	0.151	-0.003	-0.101	-0.100
Dispersividad Vertical - Caso 3	0.058	0.151	-0.003	-0.100	-0.106
Dispersividad Vertical - Caso 4	0.065	0.151	-0.003	-0.099	-0.114
Dispersividad Vertical - Caso 5	0.067	0.151	-0.003	-0.099	-0.116
Dispersividad Vertical - Caso 6	0.070	0.151	-0.003	-0.098	-0.119

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo en las Tabla B-11 y Tabla B-12, se tiene que al aumentar la dispersividad vertical aumenta la entrada por el Borde Salmuera, lo cual se aprecia en el parámetro R_D , además de aumentar las salidas por la condición de drenaje. Por otro lado, los parámetros C_0 y α no presentan variaciones significativas al modificar la dispersividad vertical.

Tabla B-12: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Dispersividad Vertical

Modelo	Parámetro C_o	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Dispersividad Vertical - Caso 1	95.5	0.007	0.454	0.000	0.133	0.308	-0.013
Dispersividad Vertical - Caso 2	95.4	0.007	0.431	0.000	0.171	0.354	-0.013
Dispersividad Vertical - Caso 3	95.2	0.007	0.417	0.041	0.205	0.388	-0.014
Dispersividad Vertical - Caso 4	95.1	0.007	0.403	0.121	0.231	0.431	-0.017
Dispersividad Vertical - Caso 5	95.0	0.007	0.399	0.154	0.247	0.443	-0.018
Dispersividad Vertical - Caso 6	94.8	0.007	0.392	0.197	0.268	0.463	-0.018

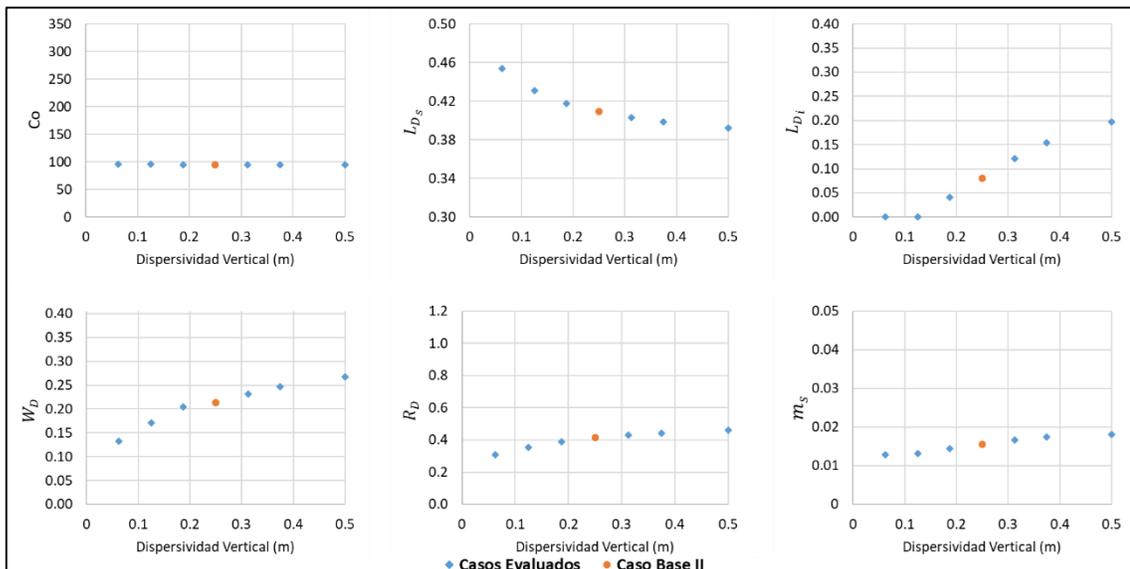
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la forma de la interfaz salina, primero se ve en la Tabla B-12 que existe un efecto importante de la dispersividad vertical donde al aumentar su valor afecta la forma de la cuña salina, abarcando una extensión menor como lo reflejan los valores de L_{D_s} y L_{D_i} . Además, existe un aumento del espesor dado por el valor de W_D .

En la Figura B-10 se muestran los parámetros graficados con respecto a la dispersividad vertical, donde existe un nulo efecto sobre C_o , una leve tendencia creciente para los parámetros R_D y m_s , decreciente para L_{D_s} y creciente para L_{D_i} , mientras que es creciente para el espesor W_D .

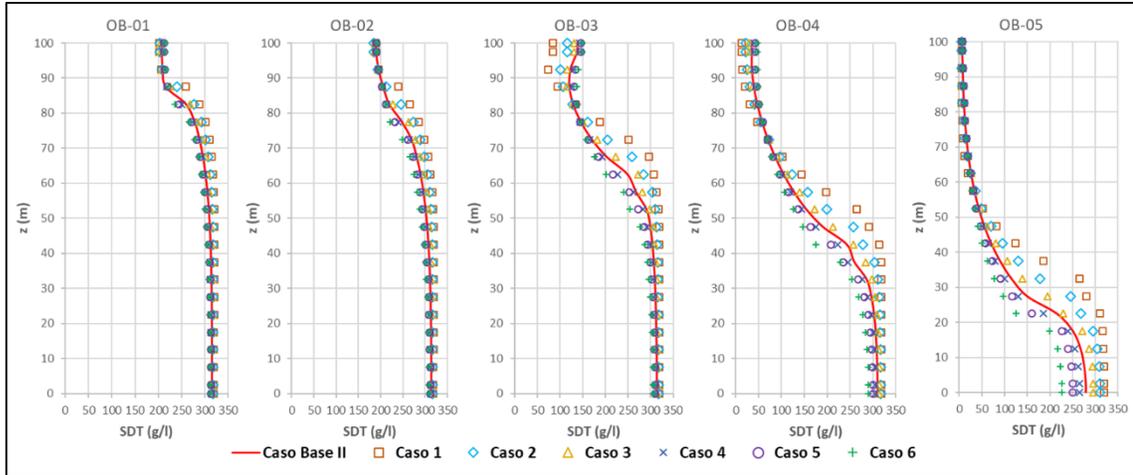
También, en la Figura B-11 se ve que existe un efecto de la dispersividad vertical en las concentraciones en profundidad, donde a mayor dispersividad vertical la transición entre un tipo de agua y otra es abrupto, además de ser la dirección de mezcla preferentemente vertical. Lo anterior se corrobora en la Figura B-12, en donde la interfaz salina se vuelve cada vez más vertical a valores altos de la dispersividad vertical, pero conservando la forma general de la zona de mezcla.

Figura B-10: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Dispersividad Vertical



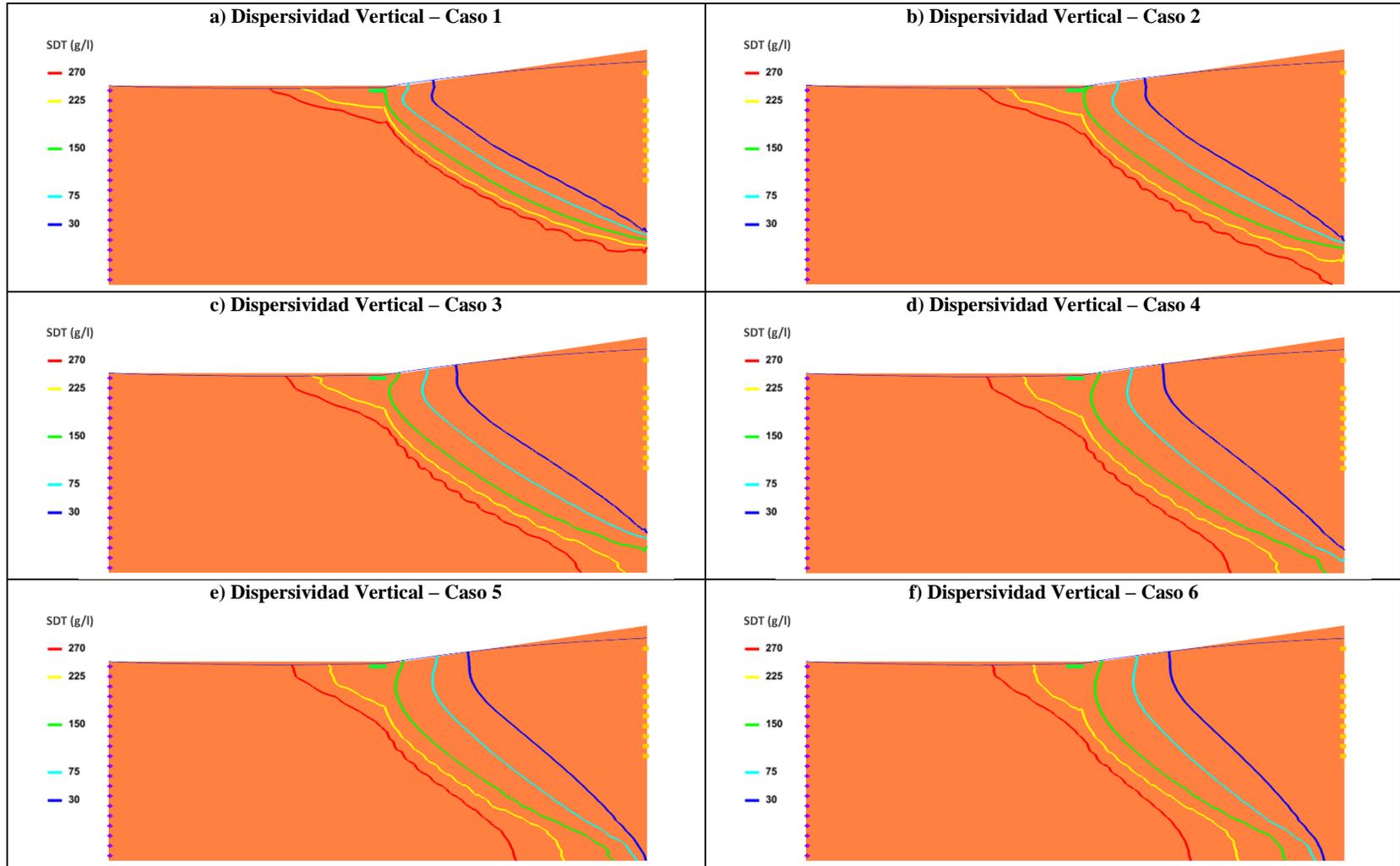
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-11: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Dispersividad Vertical



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-12: Isolneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – Dispersividad Vertical



a): Modelo considerando una dispersividad vertical de 0.0625 m. b): Modelo considerando una dispersividad vertical de 0.125 m.
c): Modelo considerando una dispersividad vertical de 0.1875 m. d): Modelo considerando una dispersividad vertical de 0.3125 m.
e): Modelo considerando una dispersividad vertical de 0.375 m. f): Modelo considerando una dispersividad vertical de 0.5 m.

Fuente: Elaboración propia.

B.5. Dispersividad Longitudinal-Vertical

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de dispersividad longitudinal, en la Tabla B-13 se ve que el efecto es mínimo en dichas variables, sin tener una tendencia clara.

Tabla B-13: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal-Vertical

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 1	96.9	112.3	5.0	333.5
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 2	96.5	112.1	5.0	325.7
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 3	96.3	112.0	5.0	326.0
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 4	96.3	111.8	5.0	325.5
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 5	96.3	111.7	5.0	326.6
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 6	96.4	111.6	5.0	327.6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-14: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal-Vertical

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 1	0.040	0.151	-0.003	-0.102	-0.085
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 2	0.051	0.151	-0.003	-0.101	-0.097
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 3	0.057	0.151	-0.003	-0.100	-0.105
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 4	0.066	0.151	-0.003	-0.099	-0.115
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 5	0.068	0.151	-0.003	-0.098	-0.118
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 6	0.072	0.151	-0.003	-0.098	-0.122

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo en las Tabla B-14 y Tabla B-15, se tiene que al aumentar la dispersividad aumenta la entrada a través del Borde Salmuera, lo cual se aprecia en el parámetro R_D , existiendo un aumento de las salidas por la condición de dren. Por otro lado, los parámetros C_0 y α no presentan variaciones significativas al modificar la dispersividad.

Tabla B-15: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal-Vertical

Modelo	Parámetro C_o	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.133	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 1	95.811	0.007	0.453	0.000	0.129	0.264	-0.013
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 2	95.484	0.007	0.431	0.000	0.169	0.336	-0.013
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 3	95.283	0.007	0.417	0.025	0.195	0.381	-0.014
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 4	95.007	0.007	0.404	0.134	0.239	0.438	-0.017
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 5	94.902	0.007	0.399	0.175	0.274	0.454	-0.018
Disp. Longitudinal-Vertical - Caso 6	94.651	0.007	0.394	0.229	0.318	0.481	-0.018

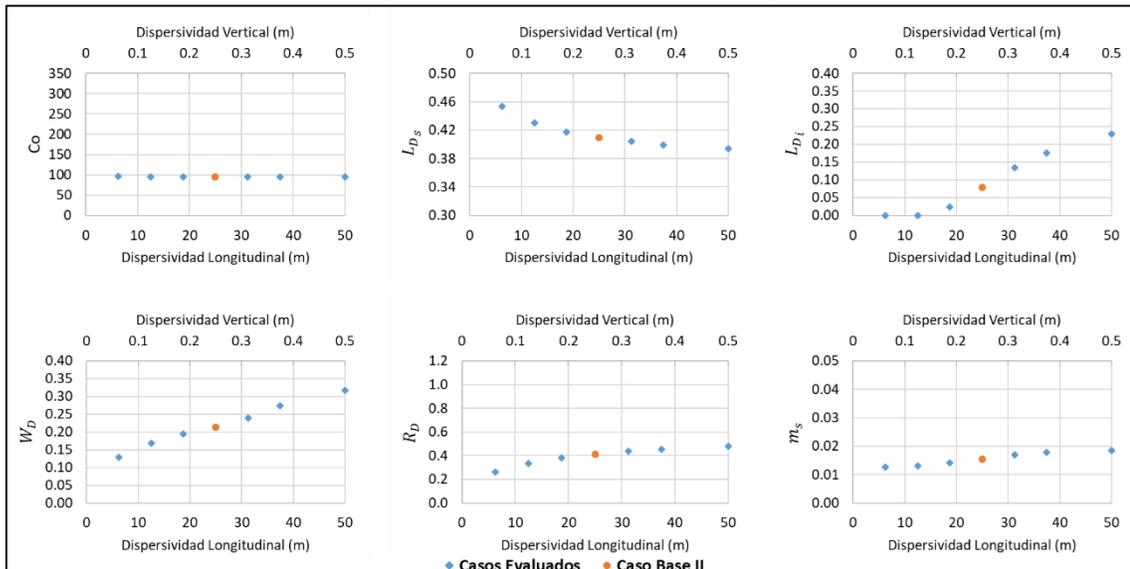
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, primero se ve que en la Tabla B-15 existe un desplazamiento de la interfaz salina producto del aumento de la dispersividad, como lo reflejan los valores de L_{D_s} y L_{D_i} , además de aumentar de manera importante el espesor dado por W_D . Con respecto a la pendiente de la interfaz m_s , se tiene que aumenta levemente al aumentar la dispersividad.

En la Figura B-13 se muestran los parámetros graficados con respecto a las dispersividades, donde existe un nulo efecto sobre C_o , una leve tendencia creciente para los parámetros R_D y m_s , decreciente para L_{D_s} y creciente para L_{D_i} , mientras que es creciente y lineal para el espesor W_D .

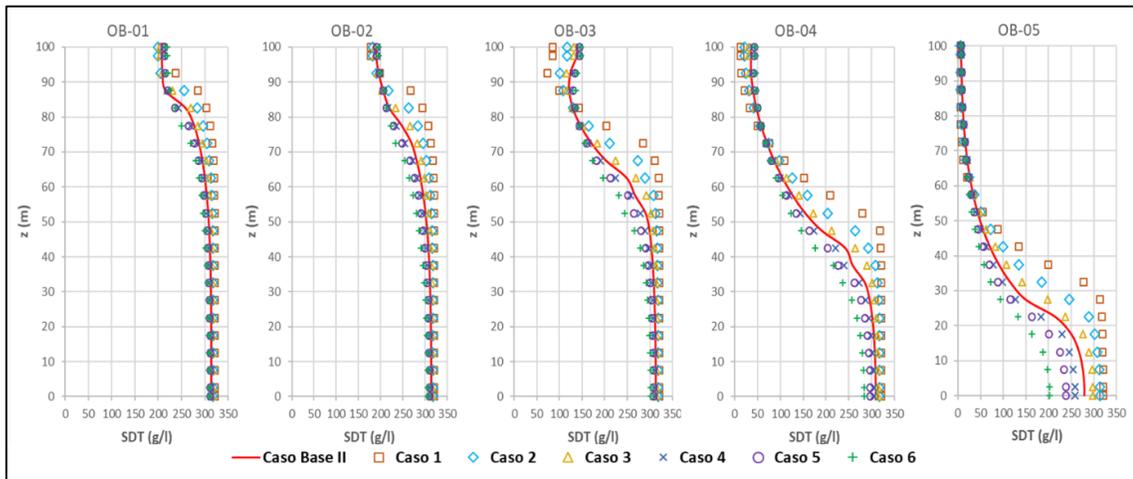
También, en la Figura B-14 se ve que existe un desplazamiento de la interfaz, aunque con mayor importancia en profundidad y más cercano al Borde Agua Dulce. Lo anterior se corrobora en la Figura B-15, donde la interfaz salina se va descomprimiendo para valores altos de la dispersividad, y cambiando la inclinación del eje central de ésta.

Figura B-13: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal-Vertical



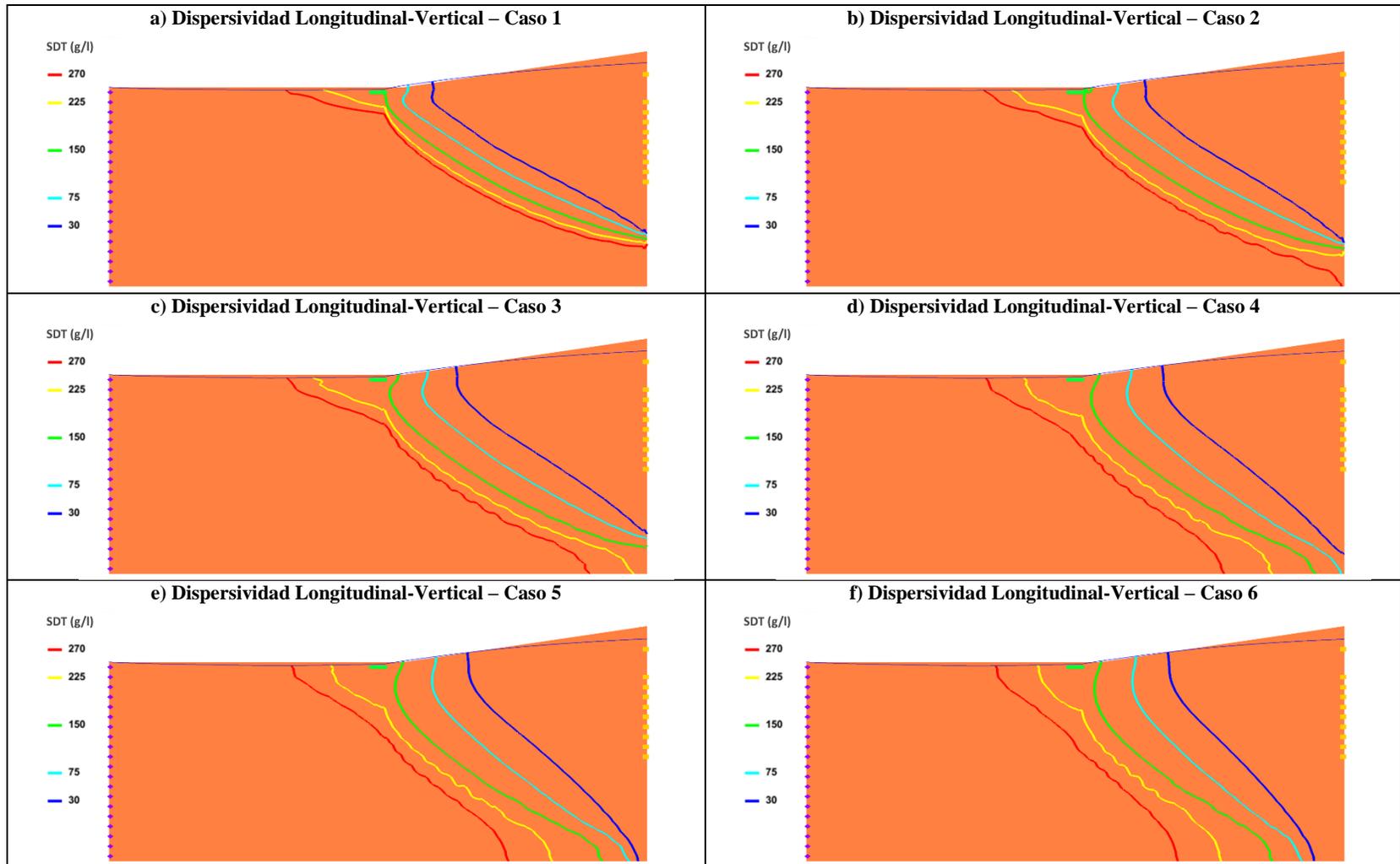
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-14: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Dispersividad Longitudinal-Vertical



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-15: Isolneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz - Dispersividad Longitudinal-Vertical



a): Modelo con dispersividad longitudinal de 6.25 m y vertical de 0.063 m. b): Modelo con dispersividad longitudinal de 12.5 m y vertical de 0.125 m.
 c): Modelo con dispersividad longitudinal de 18.75 m y vertical de 0.188 m. d): Modelo con dispersividad longitudinal de 31.25 m y vertical de 0.313m.
 e): Modelo con dispersividad longitudinal de 37.5 m y vertical de 0.375 m. f): Modelo con dispersividad longitudinal de 50 m y vertical de 0.5 m.

Fuente: Elaboración propia.

B.6. Anisotropía Vertical

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de anisotropía vertical, en la Tabla B-16 se ve que no existe un efecto importante en las variables, aumentando la concentración máxima de SDT a medida que aumenta la anisotropía vertical, lo cual se puede deber a un menor flujo vertical evapoconcentrándose en superficie.

Tabla B-16: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Anisotropía Vertical

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
Anisotropía Vertical - Caso 1	96.3	111.8	5.0	320.6
Anisotropía Vertical - Caso 2	96.3	111.9	5.0	322.6
Anisotropía Vertical - Caso 3	96.3	111.9	5.0	326.8
Anisotropía Vertical - Caso 4	96.3	111.9	5.0	325.1
Anisotropía Vertical - Caso 5	96.3	111.9	5.0	327.6
Anisotropía Vertical - Caso 6	96.3	111.9	5.0	329.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-17: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Anisotropía Vertical

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Anisotropía Vertical - Caso 1	0.063	0.151	-0.003	-0.099	-0.112
Anisotropía Vertical - Caso 2	0.063	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Anisotropía Vertical - Caso 3	0.063	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Anisotropía Vertical - Caso 4	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.110
Anisotropía Vertical - Caso 5	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.110
Anisotropía Vertical - Caso 6	0.061	0.151	-0.003	-0.100	-0.109

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo en las Tabla B-17 y Tabla B-18, se tiene que al aumentar la anisotropía vertical disminuye levemente la entrada a través del Borde Salmuera, lo cual se aprecia en el parámetro R_D . Por otro lado, los parámetros C_0 y α no presentan variaciones significativas al modificar la anisotropía vertical.

Tabla B-18: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Anisotropía Vertical

Modelo	Parámetro C_0	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Anisotropía Vertical - Caso 1	95.1	0.007	0.410	0.083	0.215	0.419	-0.016
Anisotropía Vertical - Caso 2	95.1	0.007	0.410	0.082	0.215	0.417	-0.016
Anisotropía Vertical - Caso 3	95.1	0.007	0.410	0.081	0.214	0.415	-0.016
Anisotropía Vertical - Caso 4	95.2	0.007	0.409	0.079	0.214	0.411	-0.015
Anisotropía Vertical - Caso 5	95.2	0.007	0.409	0.079	0.214	0.410	-0.015
Anisotropía Vertical - Caso 6	95.2	0.007	0.409	0.077	0.214	0.407	-0.015

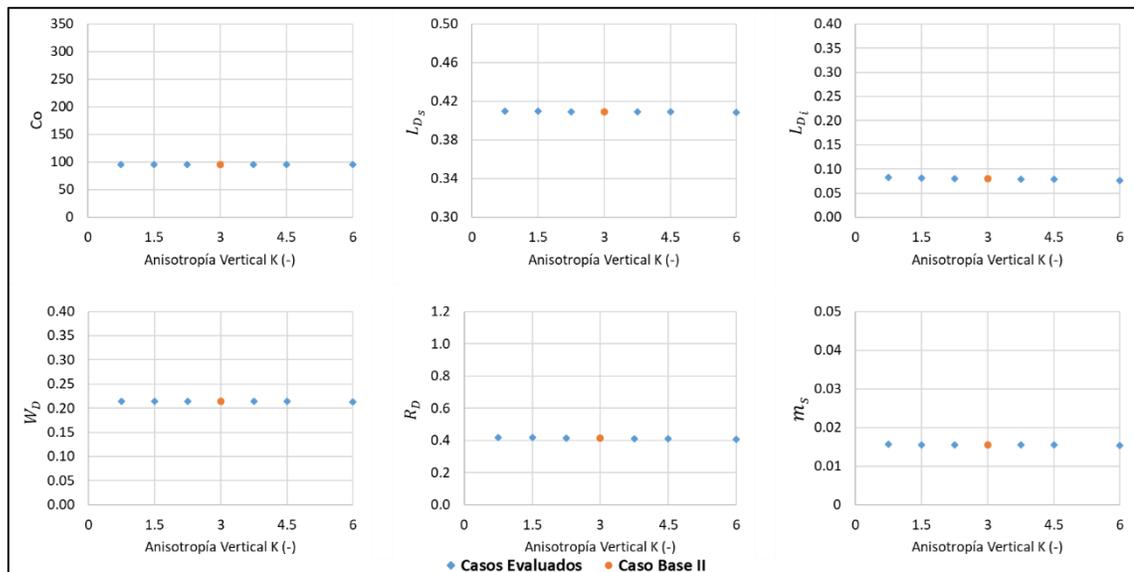
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura B-16 se muestran los parámetros graficados con respecto a la anisotropía vertical, se tiene que no existe un efecto importante sobre las variables, teniendo una relación prácticamente constante.

En el caso de la interfaz salina, primero se ve que en la Tabla B-18 no existe desplazamiento de la interfaz, como lo reflejan los valores de L_{D_s} y L_{D_i} , además de mantenerse el espesor dado por W_D y la pendiente m_s .

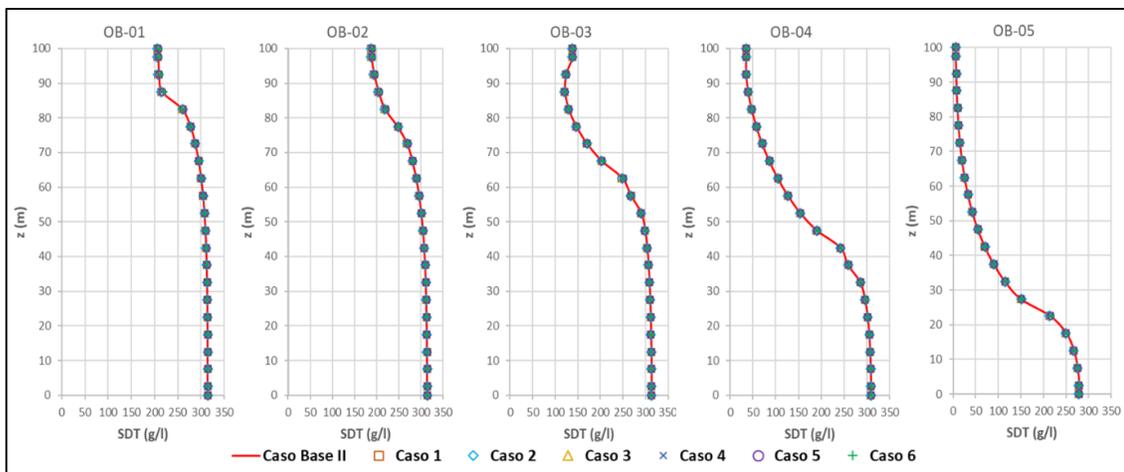
También, en la Figura B-17 se nota el nulo desplazamiento de la interfaz al cambiar la anisotropía con respecto al Caso Base. Lo anterior se corrobora en la Figura B-18, donde la interfaz mantiene su forma para los distintos casos evaluados.

Figura B-16: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Anisotropía Vertical



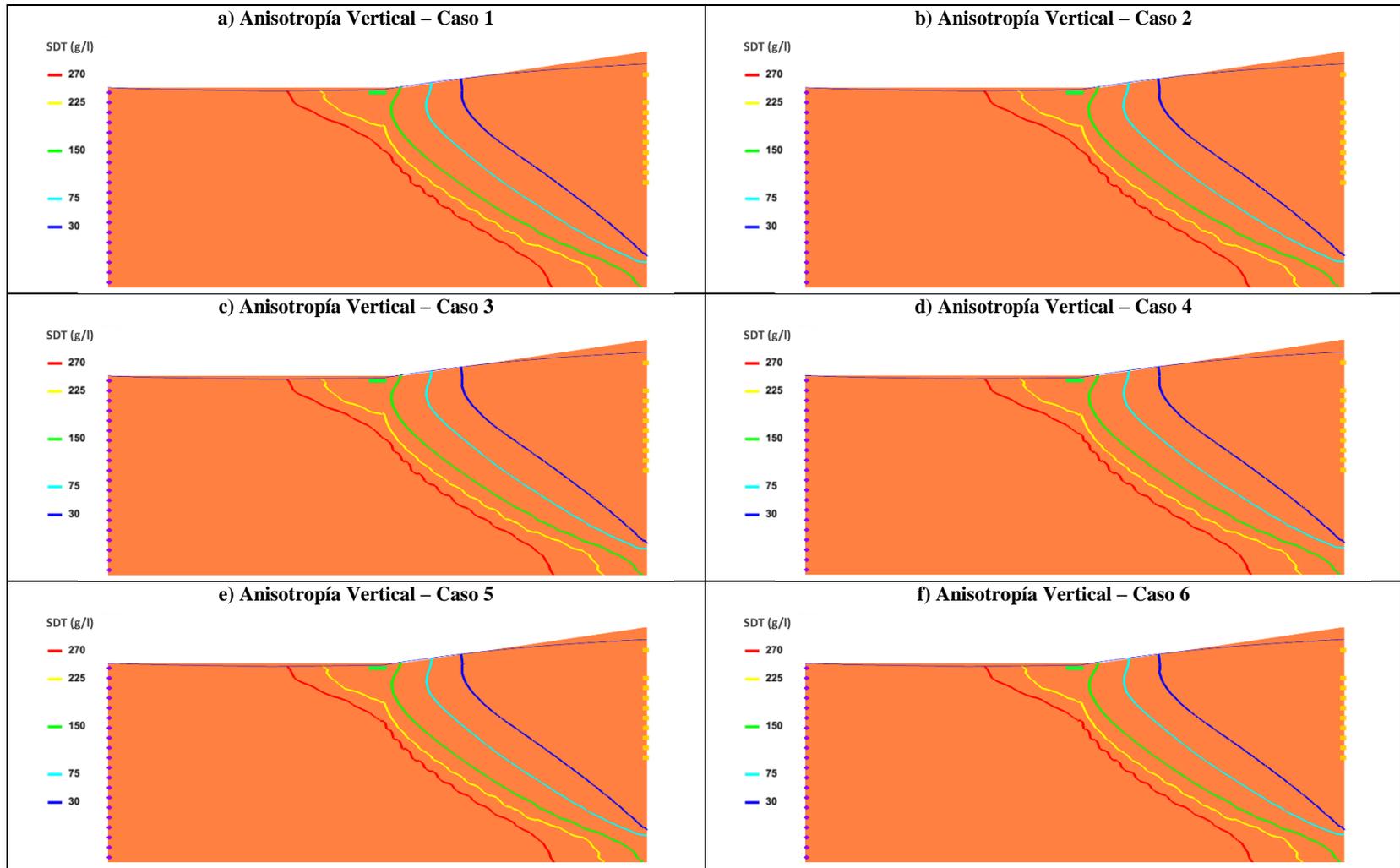
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-17: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Anisotropía Vertical



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-18: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – Anisotropía Vertical



a): Modelo considerando una anisotropía vertical de 0.75. b) Modelo considerando una anisotropía vertical de 1.5.
c): Modelo considerando una anisotropía vertical de 2.25. d): Modelo considerando una anisotropía vertical de 3.75.
e) Modelo considerando una anisotropía vertical de 4.5. f): Modelo considerando una anisotropía vertical de 6.

Fuente: Elaboración propia.

B.7. Tasa de Evaporación

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de tasa de evaporación, en la Tabla B-19 se ve que existe un aumento de la concentración máxima de SDT a medida que aumenta la tasa de evaporación, lo cual se puede deber a un aumento de la evapoconcentrándose en superficie.

Tabla B-19: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Tasa de Evaporación

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
Tasa de Evaporación - Caso 1	96.0	112.0	4.9	314.5
Tasa de Evaporación - Caso 2	96.1	111.9	5.0	318.9
Tasa de Evaporación - Caso 3	96.2	111.9	5.0	321.6
Tasa de Evaporación - Caso 4	96.4	111.9	5.0	330.7
Tasa de Evaporación - Caso 5	96.5	112.0	5.0	335.2
Tasa de Evaporación - Caso 6	96.5	112.0	5.0	335.3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-20: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Tasa de Evaporación

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Tasa de Evaporación - Caso 1	0.076	0.151	-0.001	-0.027	-0.199
Tasa de Evaporación - Caso 2	0.072	0.151	-0.002	-0.052	-0.169
Tasa de Evaporación - Caso 3	0.067	0.151	-0.003	-0.078	-0.137
Tasa de Evaporación - Caso 4	0.057	0.151	-0.003	-0.114	-0.090
Tasa de Evaporación - Caso 5	0.054	0.151	-0.004	-0.122	-0.079
Tasa de Evaporación - Caso 6	0.052	0.151	-0.004	-0.126	-0.072

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo en las Tabla B-20 y Tabla B-21 se tiene que al aumentar la tasa de evaporación disminuye la entrada a través del Borde Salmuera, lo cual se aprecia en el parámetro R_D . Además, y al aumentar los flujos de salida por las zonas de evaporación y al disminuir los niveles, se tiene que disminuyen los flujos de salida a través de la condición de drenaje en las lagunas. Por otro lado, los parámetros C_0 y α no presentan variaciones significativas al modificar la anisotropía vertical.

Tabla B-21: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Tasa de Evaporación

Modelo	Parámetro C_0	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.133	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Tasa de Evaporación - Caso 1	95.260	0.007	0.482	0.144	0.205	0.508	-0.017
Tasa de Evaporación - Caso 2	95.204	0.007	0.464	0.123	0.216	0.481	-0.017
Tasa de Evaporación - Caso 3	95.151	0.007	0.432	0.101	0.214	0.447	-0.016
Tasa de Evaporación - Caso 4	95.197	0.007	0.395	0.062	0.212	0.381	-0.015
Tasa de Evaporación - Caso 5	95.270	0.007	0.388	0.054	0.212	0.377	-0.015
Tasa de Evaporación - Caso 6	95.324	0.007	0.383	0.057	0.215	0.403	-0.015

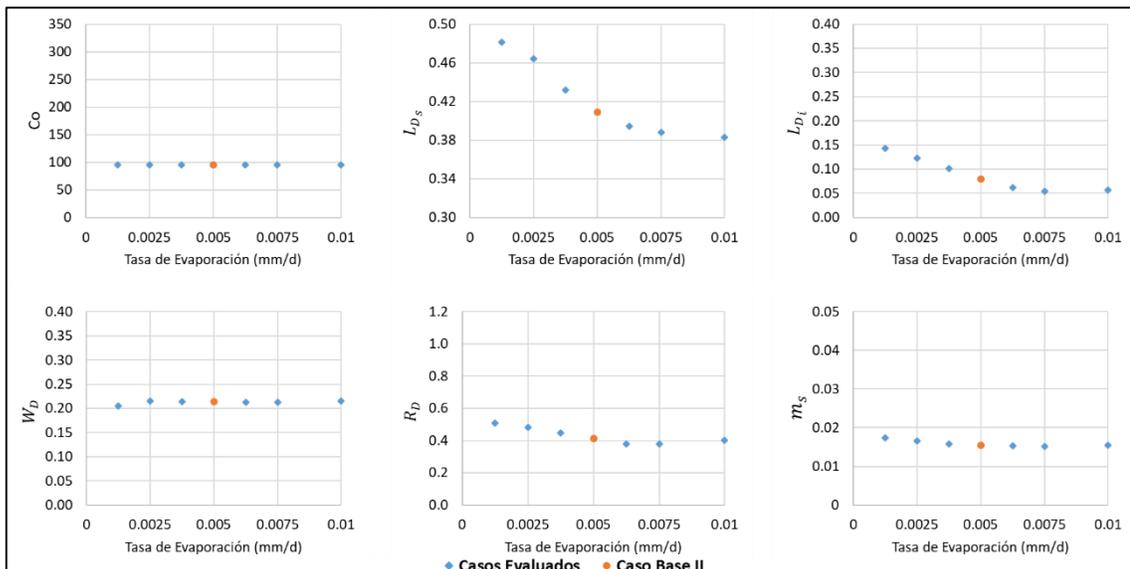
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, primero se ve que en la Tabla B-21 que existe un desplazamiento de la interfaz, acercándose al Borde Agua Dulce, como lo reflejan los valores de L_{D_s} y L_{D_i} . Esto se puede deber a una reducción de los niveles de agua en el Borde Agua Dulce debido al aumento de la tasa de evaporación. En el caso de W_D y m_s , estos no tienen diferencias significativas con respecto al caso base.

En la Figura B-19 se muestran los parámetros graficados con respecto a la tasa de evaporación, donde existe un nulo efecto sobre C_0 y W_D , una leve tendencia decreciente para los parámetros R_D y m_s , y decreciente para los parámetros de forma de la interfaz L_{D_s} y L_{D_i} siendo mayor la pendiente para el primero.

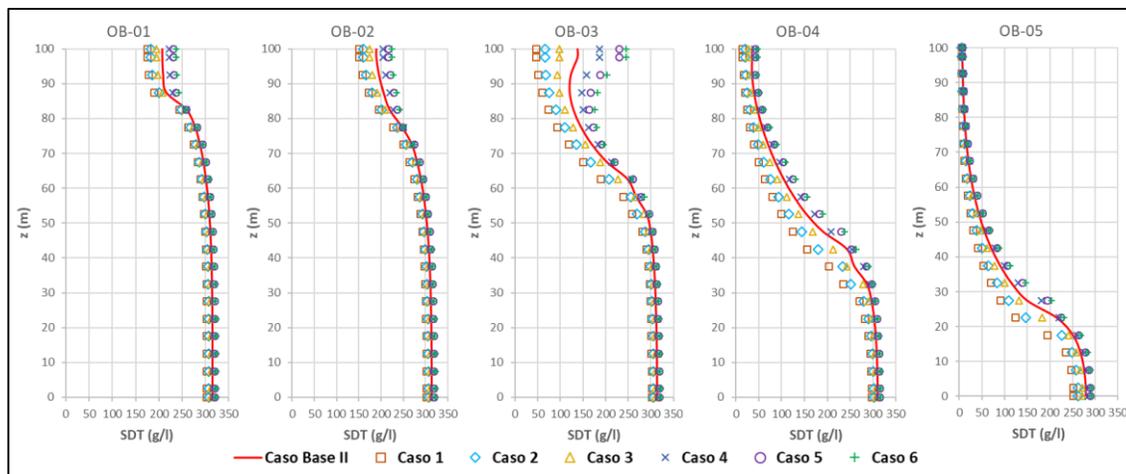
En la Figura B-20 se corrobora el desplazamiento de la interfaz salina, siendo más importante en el Borde Agua Dulce. Lo anterior se complementa en la Figura B-21, donde la zona de mezcla ve afectada su forma en la parte más superficial que en la profunda.

Figura B-19: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Tasa de Evaporación



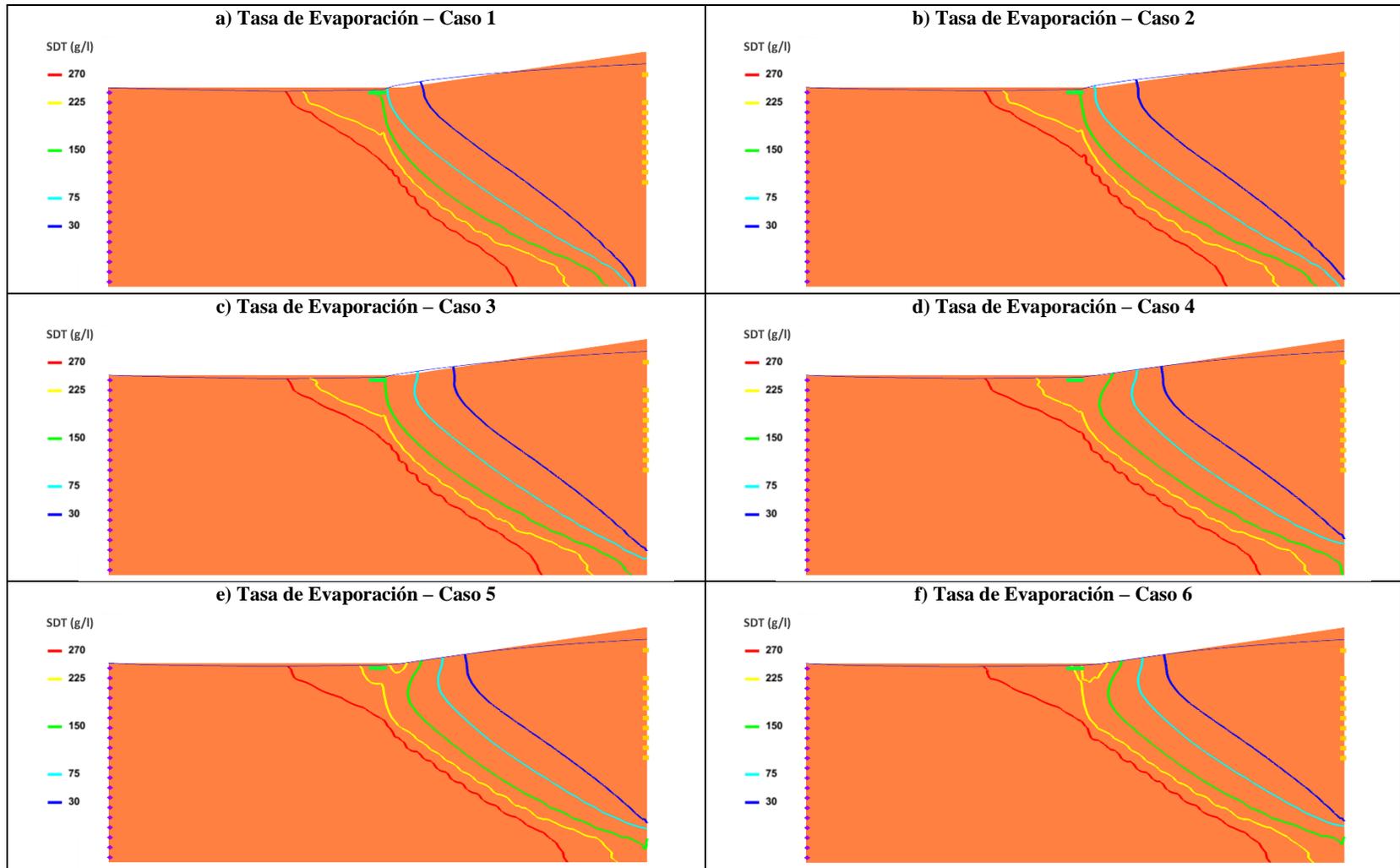
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-20: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Tasa de Evaporación



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-21: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – Tasa de Evaporación



a): Modelo considerando una tasa de evaporación de 0.00013 – 0.0013 m/d. b): Modelo considerando una tasa de evaporación de 0.00025 – 0.0025 m/d.
 c): Modelo considerando una tasa de evaporación de 0.00038 – 0.0038 m/d. d): Modelo considerando una tasa de evaporación de 0.00063 – 0.0063 m/d.
 e): Modelo considerando una tasa de evaporación de 0.00075 – 0.0075 m/d. f): Modelo considerando una tasa de evaporación de 0.001 – 0.01 m/d.

Fuente: Elaboración propia.

B.8. Porosidad

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de porosidad, en la Tabla B-22 se ve que no existen cambios relevantes en dichas variables al cambiar la porosidad.

Tabla B-22: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Porosidad

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.293	111.883	5.006	326.726
Porosidad - Caso 1	96.278	111.869	4.995	328.162
Porosidad - Caso 2	96.297	111.888	5.002	327.328
Porosidad - Caso 3	96.291	111.882	5.005	327.127
Porosidad - Caso 4	96.296	111.886	5.006	326.428
Porosidad - Caso 5	96.298	111.887	5.005	325.776
Porosidad - Caso 6	96.300	111.888	5.004	326.394

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-23: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Porosidad

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Porosidad - Caso 1	0.063	0.000	-0.003	-0.099	-0.112
Porosidad - Caso 2	0.062	0.000	-0.003	-0.099	-0.111
Porosidad - Caso 3	0.062	0.000	-0.003	-0.099	-0.111
Porosidad - Caso 4	0.062	0.000	-0.003	-0.099	-0.110
Porosidad - Caso 5	0.062	0.000	-0.003	-0.099	-0.110
Porosidad - Caso 6	0.062	0.000	-0.003	-0.099	-0.110

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo en las Tabla B-23 y Tabla B-24, tampoco existen variaciones importantes en ellos.

Tabla B-24: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Porosidad

Modelo	Parámetro C_o	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.133	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Porosidad - Caso 1	95.111	0.007	0.410	0.082	0.215	0.418	-0.016
Porosidad - Caso 2	95.141	0.007	0.409	0.079	0.214	0.413	-0.016
Porosidad - Caso 3	95.131	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Porosidad - Caso 4	95.138	0.007	0.409	0.080	0.214	0.413	-0.016
Porosidad - Caso 5	95.139	0.007	0.409	0.080	0.214	0.413	-0.016
Porosidad - Caso 6	95.141	0.007	0.409	0.080	0.214	0.413	-0.016

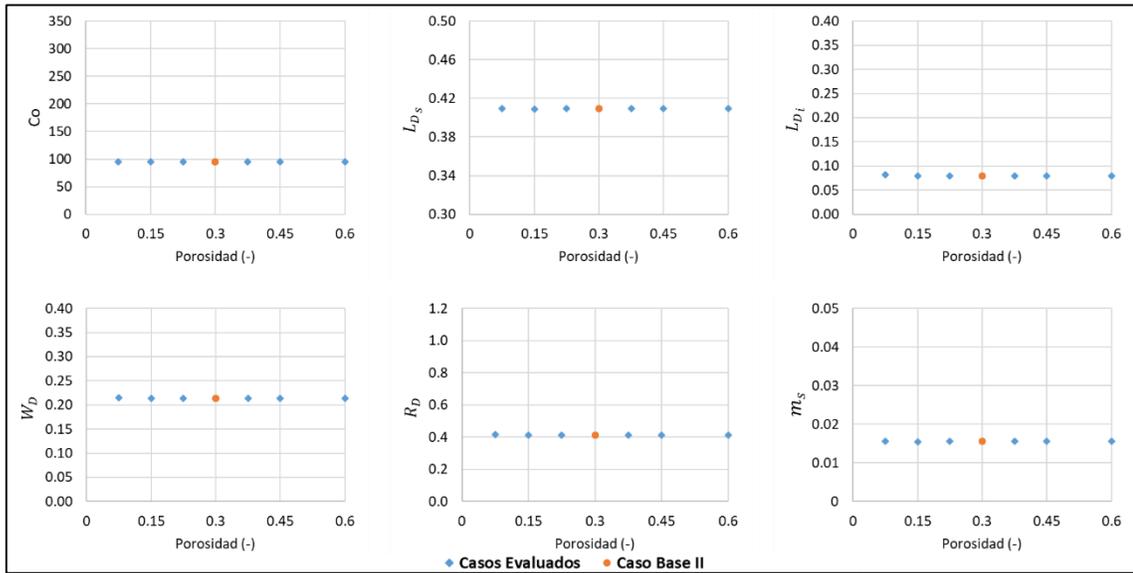
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, primero se ve en la Tabla B-24 que existe no existe un desplazamiento de importancia de la interfaz, como lo reflejan los valores de L_{D_s} y L_{D_i} , además de mantenerse el espesor dado por W_D y la pendiente por m_s .

En la Figura B-22 se muestran los parámetros graficados con respecto a la porosidad, donde existe un nulo efecto sobre las variables analizadas.

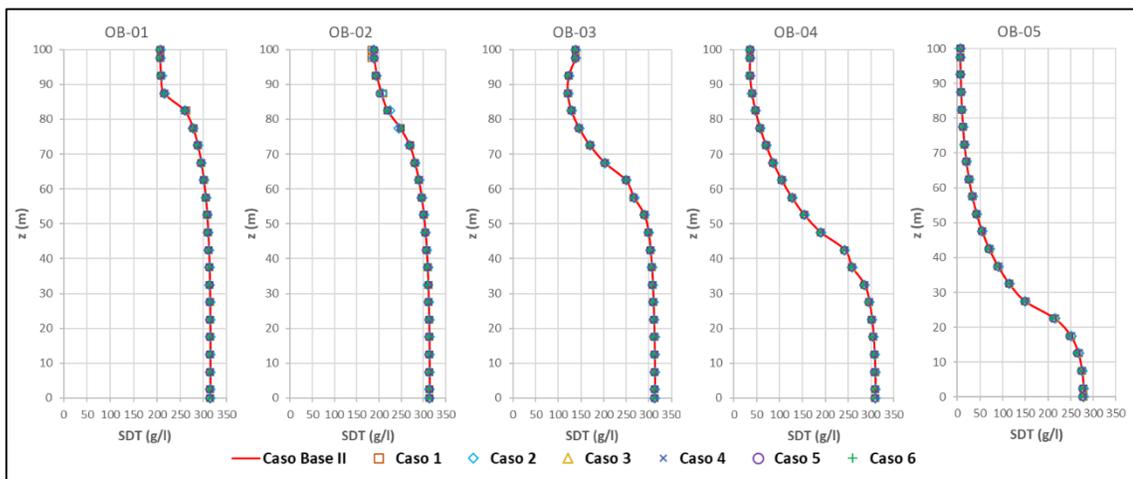
También, en la Figura B-23 se nota el nulo desplazamiento de la interfaz al cambiar la anisotropía con respecto al Caso Base. Lo anterior se corrobora en la Figura B-24, donde la interfaz mantiene su forma para los distintos casos evaluados.

Figura B-22: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Porosidad



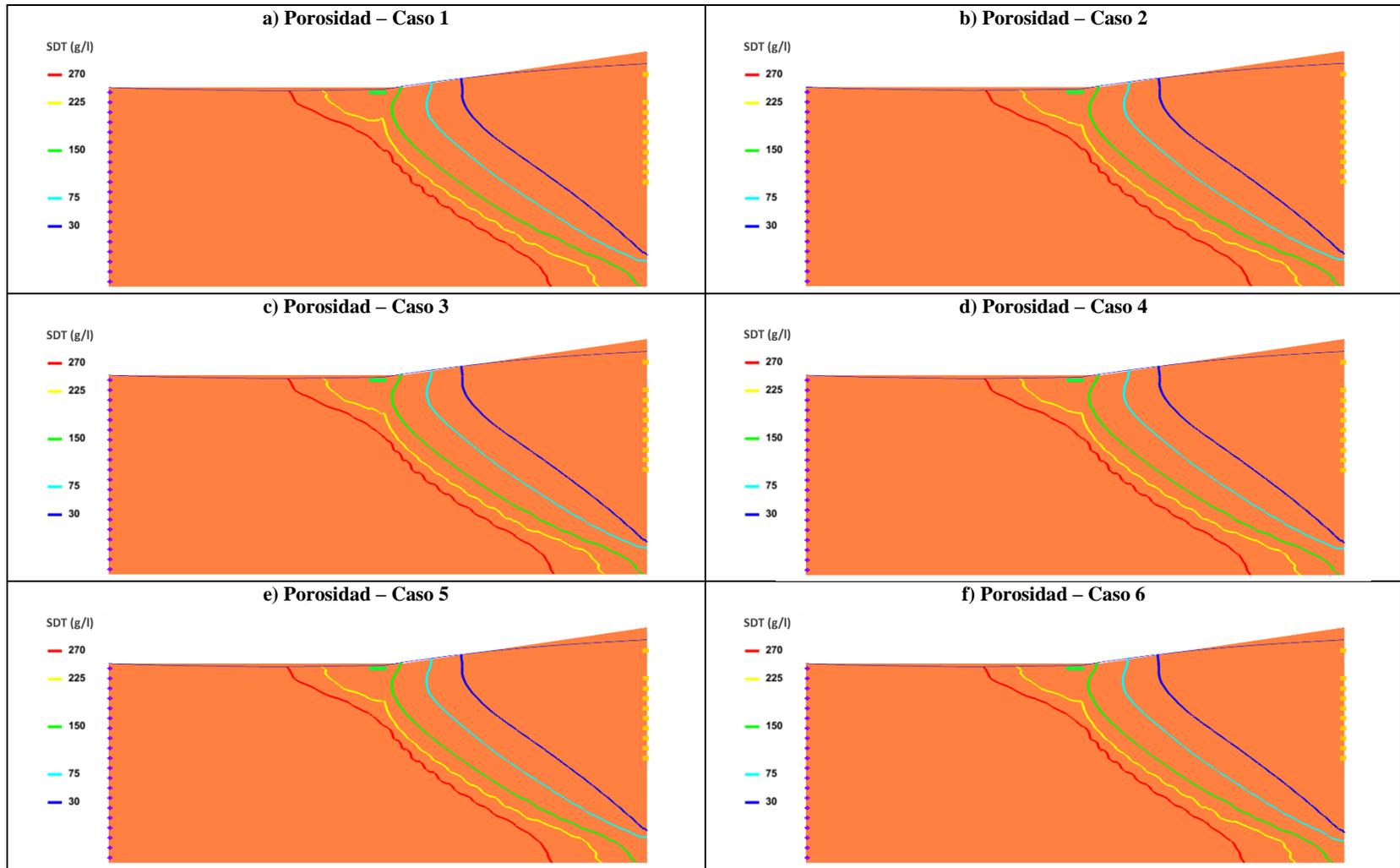
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-23: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Porosidad



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-24: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – Porosidad



a): Modelo considerando una porosidad de 0.075. b): Modelo considerando una porosidad de 0.15. c): Modelo considerando una porosidad de 0.23. d): Modelo considerando una porosidad de 0.38. e): Modelo considerando una porosidad de 0.45. f): Modelo considerando una porosidad de 0.60.

Fuente: Elaboración propia.

B.9. Carga Constante en Borde Salmuera

Para evaluar el impacto de las variaciones en los niveles de agua en el Borde Salmuera, se modifica dicha condición de borde imponiendo diferentes valores para los niveles de carga constante manteniendo las condiciones de transporte.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de Carga en el Borde Salmuera, en la Tabla B-25 se ve que no existe un efecto importante en los niveles piezométricos pero sí en la concentración máxima de SDT, donde a medida que aumenta el nivel en el Borde Salmuera, comienza a actuar la evaporación debido a que los niveles se encuentran sobre la profundidad de extinción, por lo que la concentración aumenta en superficie profundo de la evapoconcentración.

Tabla B-25: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Carga Borde Salmuera

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
Carga Borde Salmuera - Caso 1	95.5	110.7	5.0	300.1
Carga Borde Salmuera - Caso 2	95.8	111.0	5.0	300.1
Carga Borde Salmuera - Caso 3	96.0	111.3	5.0	300.1
Carga Borde Salmuera - Caso 4	96.2	111.6	5.0	316.8
Carga Borde Salmuera - Caso 5	96.3	111.7	5.0	321.7
Carga Borde Salmuera - Caso 6	96.3	112.0	5.0	330.1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-26: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Carga Borde Salmuera

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Carga Borde Salmuera - Caso 1	0.042	0.151	0.000	-0.082	-0.111
Carga Borde Salmuera - Caso 2	0.047	0.151	0.000	-0.087	-0.110
Carga Borde Salmuera - Caso 3	0.052	0.151	0.000	-0.092	-0.110
Carga Borde Salmuera - Caso 4	0.057	0.151	-0.001	-0.096	-0.110
Carga Borde Salmuera - Caso 5	0.060	0.151	-0.002	-0.098	-0.110
Carga Borde Salmuera - Caso 6	0.065	0.151	-0.004	-0.100	-0.111

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo en las Tabla B-26 y Tabla B-27, se tiene que al aumentar carga en el Borde Salmuera aumenta la entrada a través de dicha condición de borde, lo cual se aprecia en el parámetro R_D , además de aumentar las salidas por la Zona de Evap. 1 a partir de cierto valor debido al aumento en los niveles. Por otro lado, los parámetros C_0 y α no presentan variaciones significativas al modificar los niveles en el Borde Salmuera.

Tabla B-27: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Carga Borde Salmuera

Modelo	Parámetro C_o	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Carga Borde Salmuera - Caso 1	93.4	0.007	0.448	0.158	0.222	0.282	-0.017
Carga Borde Salmuera - Caso 2	93.8	0.007	0.437	0.142	0.218	0.311	-0.017
Carga Borde Salmuera - Caso 3	94.2	0.007	0.428	0.125	0.217	0.344	-0.017
Carga Borde Salmuera - Caso 4	94.7	0.007	0.419	0.106	0.216	0.377	-0.016
Carga Borde Salmuera - Caso 5	94.9	0.007	0.414	0.091	0.215	0.396	-0.016
Carga Borde Salmuera - Caso 6	95.4	0.007	0.405	0.064	0.213	0.432	-0.015

Fuente: Elaboración propia.

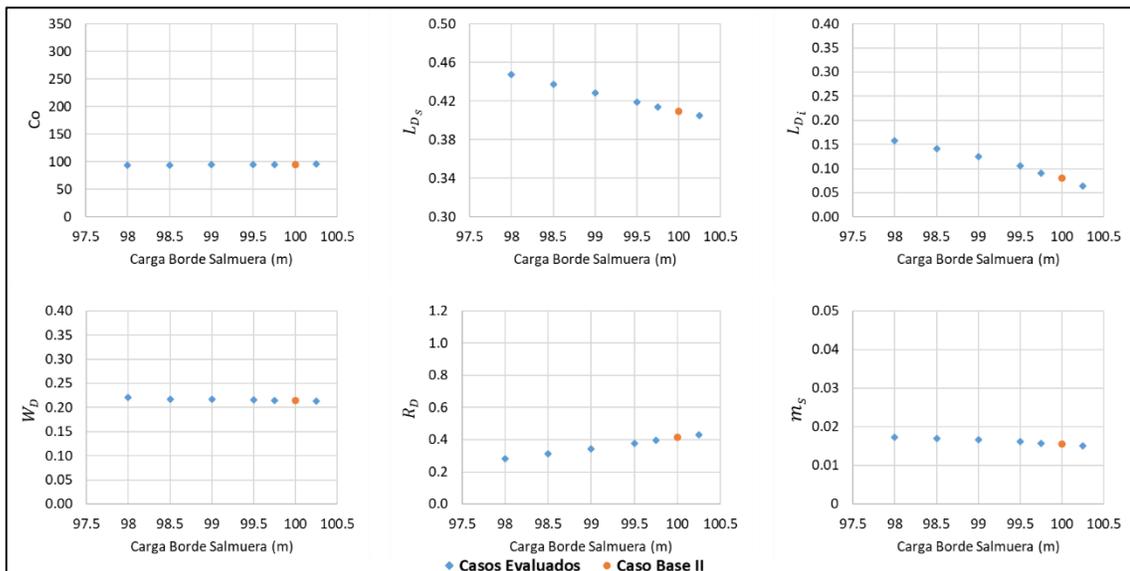
En el caso de la interfaz salina, primero se ve que en la Tabla B-27 existe un desplazamiento leve de la interfaz salina producto del aumento de la carga en el Borde Salmuera, como lo reflejan los valores de L_{D_s} y L_{D_i} , además de disminuir levemente el espesor dado por W_D y la pendiente m_s .

En la Figura B-25 se muestran los parámetros graficados con respecto a la carga en el Borde Salmuera, donde existe una relación constante para el parámetro C_o , un decrecimiento leve para los parámetros W_D y m_s , un crecimiento lineal para el parámetro R_D , y una tendencia decreciente y lineal para los parámetros de forma de la interfaz dados por L_{D_s} y L_{D_i} .

También, en la Figura B-26 se ve que existe un desplazamiento de la interfaz, acercándose al Borde Salmuera cuando la carga en dicha condición de borde es bajo debido a que la energía es menor, y por ende, el flujo del Borde Agua Dulce desplaza la interfaz.

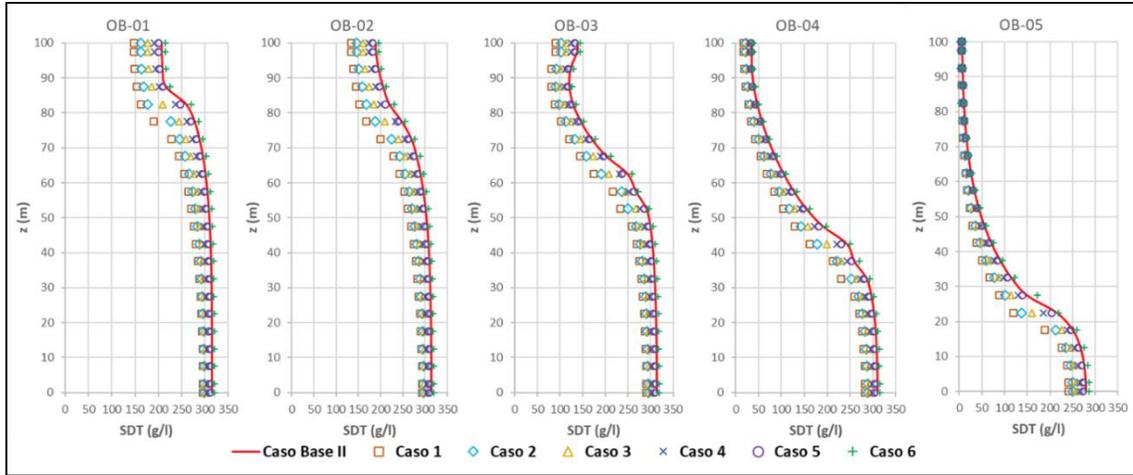
Lo anterior se corrobora en la Figura B-27, en donde la interfaz mantiene su forma pero la zona de mezcla se encuentra extendida hacia el Borde Salmuera a medida que la carga hidráulica es menor.

Figura B-25: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Carga Borde Salmuera



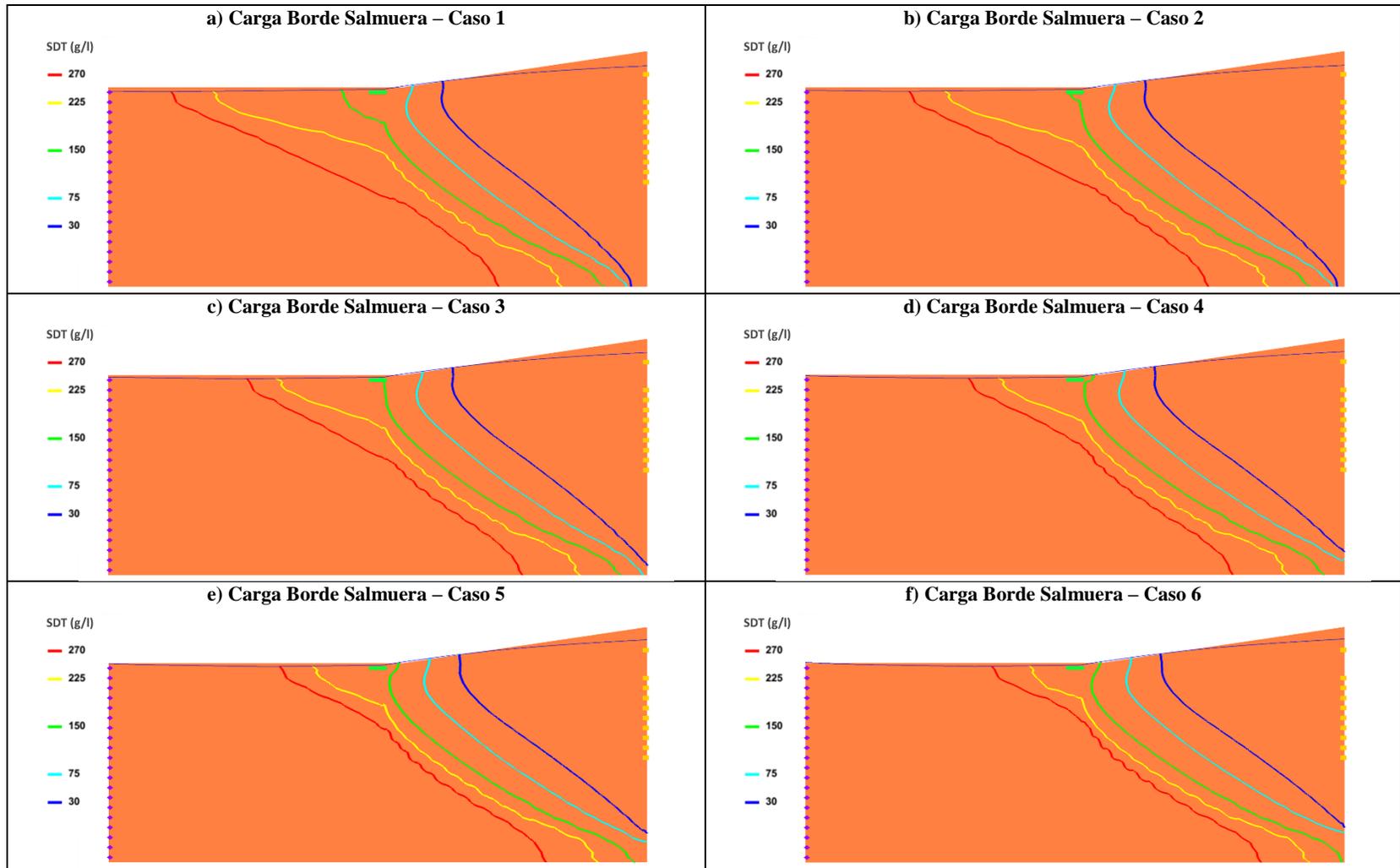
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-26: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Carga Borde Salmuera



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-27: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – Carga Borde Salmuera



a): Modelo considerando carga constante en Borde Salmuera de 98 m. b): Modelo considerando carga constante en Borde Salmuera de 98.5 m. c): Modelo considerando carga constante en Borde Salmuera de 99 m. d): Modelo considerando carga constante en Borde Salmuera de 99.5 m. e): Modelo considerando carga constante en Borde Salmuera de 99.75 m. f): Modelo considerando carga constante en Borde Salmuera de 100.25 m.

Fuente: Elaboración propia.

B.10. SDT Borde Salmuera

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de SDT Borde Salmuera, en la Tabla B-28 se ve que existe un cambio importante en dichas variables, y ligadas principalmente a la concentración y posterior densidad que alcanza el agua en el sistema, condicionando los niveles piezométricos en los bordes del modelo. Además, la concentración máxima está directamente ligada a la concentración del borde, donde porcentualmente va disminuyendo el incremento de dicha variable a medida que aumenta la concentración en el Borde Salmuera.

Tabla B-28: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – SDT Borde Salmuera

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
SDT Borde Salmuera - Caso 1	97.8	106.8	4.9	90.8
SDT Borde Salmuera - Caso 2	97.1	108.5	5.0	169.5
SDT Borde Salmuera - Caso 3	96.6	110.2	5.0	247.7
SDT Borde Salmuera - Caso 4	96.0	113.4	5.0	401.5
SDT Borde Salmuera - Caso 5	95.7	114.8	5.0	479.9
SDT Borde Salmuera - Caso 6	95.4	117.3	5.0	633.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-29: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – SDT Borde Salmuera

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
SDT Borde Salmuera - Caso 1	0.038	0.151	-0.005	-0.037	-0.146
SDT Borde Salmuera - Caso 2	0.049	0.151	-0.004	-0.062	-0.133
SDT Borde Salmuera - Caso 3	0.057	0.151	-0.003	-0.084	-0.120
SDT Borde Salmuera - Caso 4	0.070	0.151	-0.003	-0.101	-0.117
SDT Borde Salmuera - Caso 5	0.077	0.151	-0.003	-0.101	-0.124
SDT Borde Salmuera - Caso 6	0.090	0.151	-0.003	-0.102	-0.137

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo en las Tabla B-29 y Tabla B-30, se tiene que el flujo en el Borde Salmuera aumenta a medida que aumenta la concentración en dicho borde, lo cual se aprecia en el parámetro R_D . Además, y debido a los niveles que se alcanzan en el Borde de Agua Dulce, se tiene que la velocidad de recarga disminuye a medida que aumenta la concentración en el Borde Salmuera, por lo que el parámetro Co aumenta mientras que el parámetro α se mantiene constante.

Tabla B-30: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – SDT Borde Salmuera

Modelo	Parámetro C_o	Parámetro α	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
SDT Borde Salmuera - Caso 1	21.8	0.007	0.486	0.354	0.148	0.253	-0.050
SDT Borde Salmuera - Caso 2	44.9	0.007	0.477	0.252	0.185	0.323	-0.028
SDT Borde Salmuera - Caso 3	69.4	0.007	0.443	0.163	0.199	0.376	-0.020
SDT Borde Salmuera - Caso 4	121.9	0.007	0.396	0.010	0.233	0.464	-0.011
SDT Borde Salmuera - Caso 5	149.4	0.007	0.386	0.000	0.226	0.512	-0.009
SDT Borde Salmuera - Caso 6	206.8	0.007	0.371	0.000	0.204	0.598	-0.007

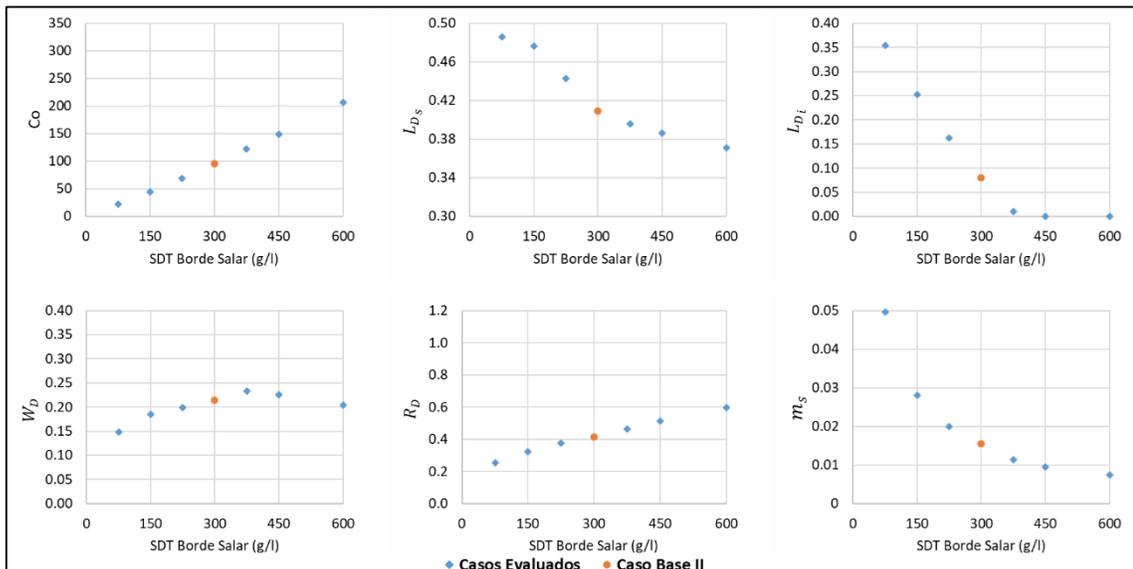
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la interfaz salina, primero se ve en la Tabla B-30 que existe un desplazamiento de la interfaz, como lo reflejan los valores de L_{D_s} y L_{D_i} , acercándose al Borde Agua Dulce e incluso desconectándose del fondo del modelo. Además, el espesor dado por W_D aumenta a medida que aumenta la concentración, mientras que la pendiente de la interfaz m_s disminuye.

En la Figura B-28 se muestran los parámetros graficados con respecto a la concentración de SDT en el Borde Salmuera, donde existe una tendencia creciente y lineal para los parámetros C_o y R_D , decreciente para los parámetros de forma de la interfaz dados por L_{D_s} , L_{D_i} y m_s , mientras que no existe una tendencia clara sobre el espesor W_D .

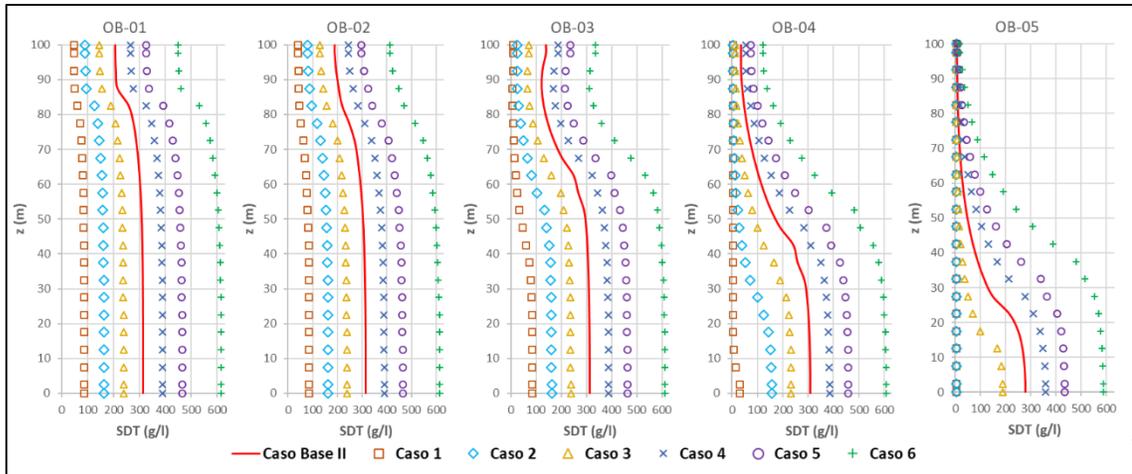
También, en la Figura B-29 se aprecia el desplazamiento de la interfaz salina, donde el efecto de la concentración en el Borde Salmuera es importante. Lo anterior se corrobora en la Figura B-30, donde la interfaz modifica su forma, incluso aumentando significativamente los niveles aguas abajo del Borde Agua Dulce debido al alto valor de densidad que alcanza el agua en el Borde Salmuera.

Figura B-28: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - SDT Borde Salmuera



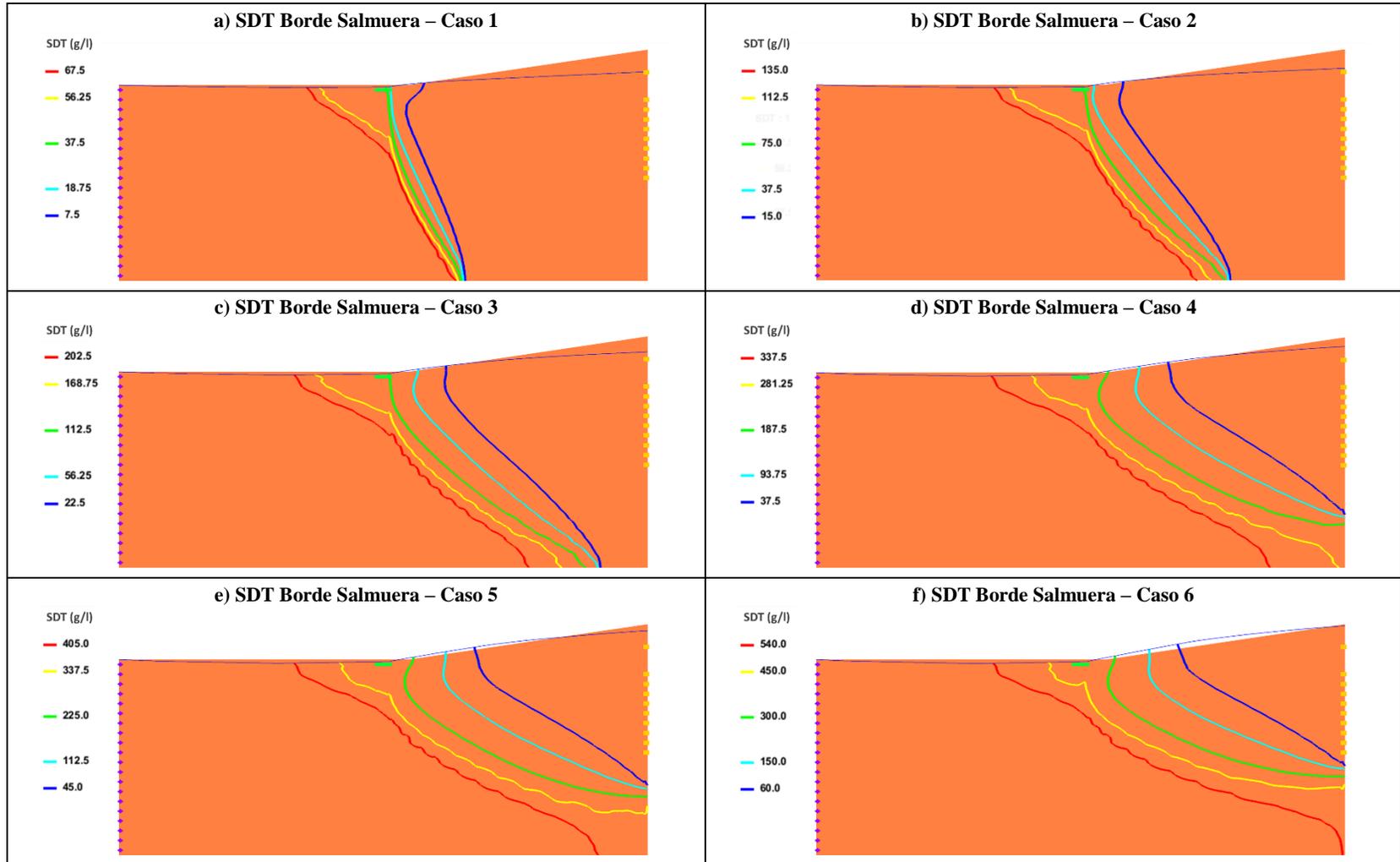
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-29: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – SDT Borde Salmuera



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-30: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de la interfaz – SDT Borde Salmuera



a): Modelo considerando una concentración en el Borde Salmuera de 75 g/l. b): Modelo considerando una concentración en el Borde Salmuera de 150 g/l.
 c): Modelo considerando una concentración en el Borde Salmuera de 225 g/l. d): Modelo considerando una concentración en el Borde Salmuera de 375 g/l.
 e): Modelo considerando una concentración en el Borde Salmuera de 450 g/l. f): Modelo considerando una concentración en el Borde Salmuera de 600 g/l.

Fuente: Elaboración propia.

B.11. Variación de la densidad con respecto a la concentración

Para evaluar el impacto de la relación entre densidad-concentración en la distribución de niveles y concentraciones, e indirectamente el efecto de la densidad, se modifica la condición de Borde Salmuera omitiendo una densidad fija para la condición de carga constante, ajustándose según la concentración resultante.

En el caso de los valores mínimos y máximos que alcanzan los niveles y las concentraciones de SDT en cada uno de los casos de variación de densidad, en la Tabla B-31 se ve que existe un efecto importante en los niveles piezométricos, donde debido a que se mantienen las condiciones de borde de la concentración, el sistema se adecúa según la densidad que alcanza en cada caso, donde a mayor pendiente de la relación Densidad-SDT ($\partial\rho/\partial C$) se obtienen mayores densidades para las mismas concentraciones.

Tabla B-31: Valores mínimos y máximos para el nivel piezométrico y la concentración de SDT – Estudio de la interfaz – Relación Densidad-SDT

Modelo	Nivel piezométrico (m)		Concentración SDT (g/l)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Caso Base II	96.3	111.9	5.0	326.7
Relación Densidad-SDT - Caso 1	96.8	109.5	4.7	332.0
Relación Densidad-SDT - Caso 2	96.5	110.7	5.0	328.9
Relación Densidad-SDT - Caso 3	96.4	111.3	5.0	326.7
Relación Densidad-SDT - Caso 4	96.2	112.5	5.0	323.9
Relación Densidad-SDT - Caso 5	96.1	113.0	5.0	322.4
Relación Densidad-SDT - Caso 6	95.9	114.0	5.0	322.2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla B-32: Flujos netos a través de las condiciones de borde – Estudio de la interfaz – Relación Densidad-SDT

Modelo	Borde Salmuera (l/s/m)	Borde Agua Dulce (l/s/m)	Zona Evap. 1 (l/s/m)	Zona Evap. 2 (l/s/m)	Drenaje (l/s/m)
Caso Base II	0.062	0.151	-0.003	-0.099	-0.111
Relación Densidad-SDT - Caso 1	0.054	0.151	-0.004	-0.076	-0.125
Relación Densidad-SDT - Caso 2	0.058	0.151	-0.003	-0.090	-0.116
Relación Densidad-SDT - Caso 3	0.060	0.151	-0.003	-0.095	-0.112
Relación Densidad-SDT - Caso 4	0.065	0.151	-0.003	-0.100	-0.112
Relación Densidad-SDT - Caso 5	0.068	0.151	-0.003	-0.101	-0.115
Relación Densidad-SDT - Caso 6	0.073	0.151	-0.003	-0.101	-0.120

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, y al analizar los parámetros de interés relacionados con el flujo en las Tabla B-32 y Tabla B-33, se tiene que al aumentar la pendiente de la Relación Densidad-SDT aumenta la entrada a través del Borde Salmuera, lo cual se aprecia en el parámetro R_D , además de aumentar las salidas por la Zona de Evap. 2 debido al aumento en los niveles. También se tiene un efecto sobre los parámetros C_0 y α , donde el primero aumenta a medida que aumenta la pendiente de la Relación Densidad-SDT, mientras que para el segundo disminuye (principalmente por los cambios de densidad).

Tabla B-33: Variables adimensionales de interés – Estudio de la interfaz – Relación Densidad-SDT

Modelo	Parámetro C_o	Parámetro a	L_{D_s}	L_{D_i}	W_D	R_D	m_s
Caso Base II	95.1	0.007	0.409	0.080	0.214	0.414	-0.016
Relación Densidad-SDT - Caso 1	59.0	0.010	0.460	0.204	0.201	0.357	-0.022
Relación Densidad-SDT - Caso 2	77.0	0.008	0.433	0.132	0.202	0.387	-0.018
Relación Densidad-SDT - Caso 3	86.3	0.007	0.420	0.106	0.208	0.401	-0.017
Relación Densidad-SDT - Caso 4	105.2	0.006	0.402	0.071	0.224	0.431	-0.015
Relación Densidad-SDT - Caso 5	114.8	0.005	0.398	0.049	0.235	0.450	-0.013
Relación Densidad-SDT - Caso 6	134.3	0.005	0.389	0.000	0.233	0.484	-0.011

Fuente: Elaboración propia.

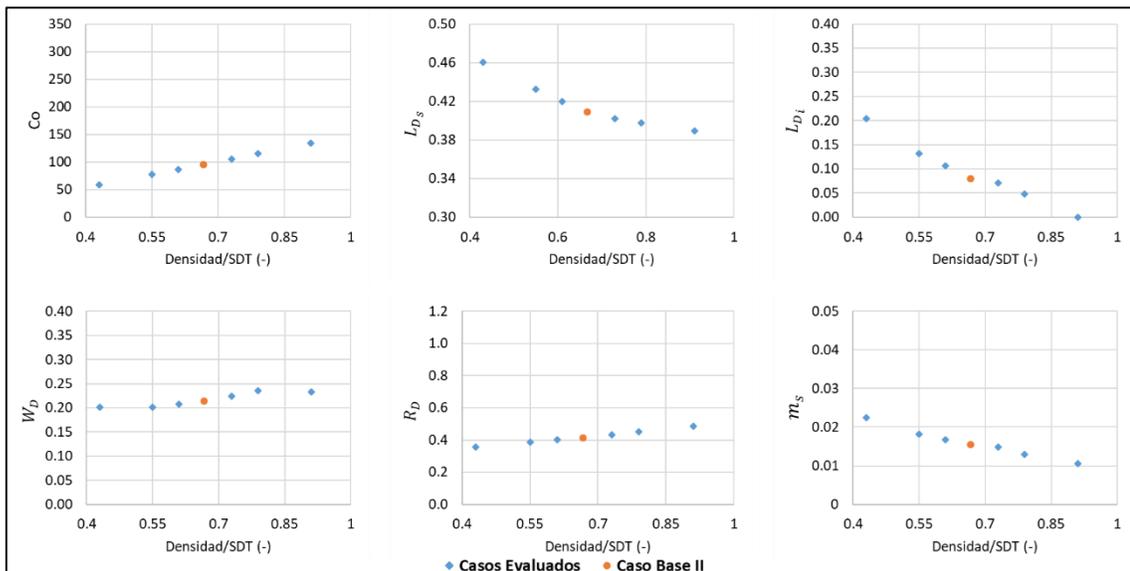
En el caso de la interfaz salina, primero se ve que en la Tabla B-33 existe un desplazamiento leve de la interfaz salina hacia el Borde Agua Dulce producto del aumento de la pendiente de la Relación Densidad-SDT, como lo reflejan los valores de L_{D_s} y L_{D_i} , además de aumentar el espesor dado por W_D y disminuir la pendiente de la interfaz m_s .

En la Figura B-31 se muestran los parámetros graficados con respecto a la pendiente de la relación entre la Densidad-SDT, donde existe una tendencia creciente para los parámetros C_o , W_D y R_D , mientras que decreciente para los parámetros de forma de la interfaz dados por L_{D_s} , L_{D_i} y m_s .

También, en la Figura B-32 se ve que existe un desplazamiento de la interfaz salina, acercándose al Borde Salmuera cuando la Relación Densidad-SDT es baja debido a que la densidad alcanzada es menor, y por ende, el flujo del Borde Agua Dulce desplaza la zona de mezcla.

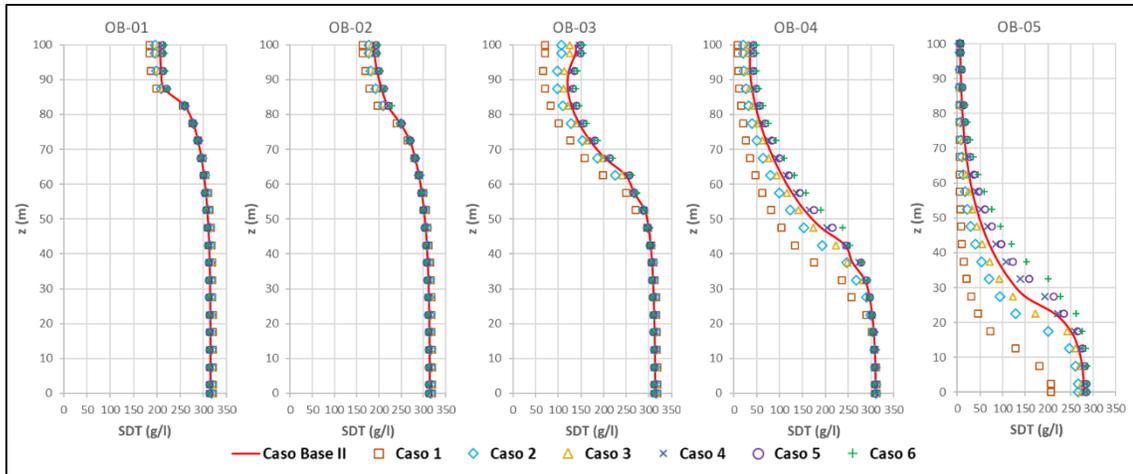
Lo anterior se corrobora en la Figura B-33, donde la interfaz se va descomprimiendo a medida que aumenta la Relación Densidad-SDT, debido a las densidades que se alcanzan en el Borde Salmuera.

Figura B-31: Gráfico de los parámetros de interés – Estudio de la interfaz - Relación Densidad-SDT



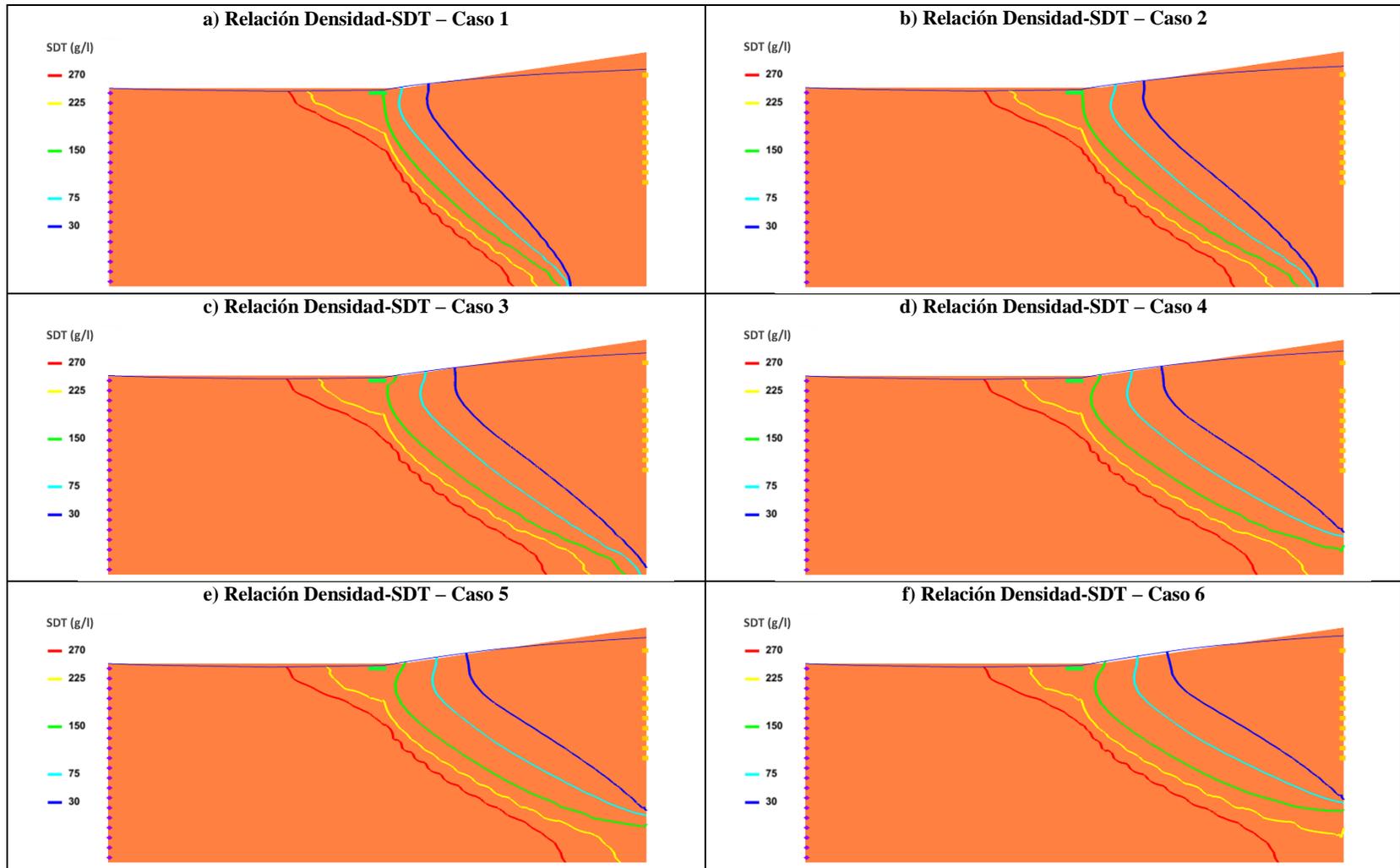
Fuente: Elaboración propia.

Figura B-32: Concentración de SDT (g/l) en profundidad - Estudio de la interfaz – Relación Densidad-SDT



Fuente: Elaboración propia.

Figura B-33: Isolíneas de concentración SDT (g/l) – Estudio de y llegó la interfaz - Relación Densidad-SDT



a): Modelo considerando una Relación Densidad-SDT de 0.43. b): Modelo considerando una Relación Densidad-SDT de 0.55.
c): Modelo considerando una Relación Densidad-SDT de 0.61. d): Modelo considerando una Relación Densidad-SDT de 0.73.
e): Modelo considerando una Relación Densidad-SDT de 0.79. f): Modelo considerando una Relación Densidad-SDT de 0.91.

Fuente: Elaboración propia.

