

## INFORME FINAL

# “DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA”

Elaborada para:



Presentada por:



23 de diciembre de 2020

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. ANTECEDENTES GENERALES .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Sistema La Punta - La Brava .....</b>	<b>18</b>
<b>3. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Objetivo general .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>21</b>
<b>4. ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>21</b>
<b>5. METODOLOGÍA .....</b>	<b>24</b>
<b>5.1. Listado de factores ambientales que controlan o modelan las lagunas La Punta y La Brava.</b>	<b>24</b>
<b>5.2. Comportamiento temporal y espacial de los factores ambientales.....</b>	<b>25</b>
<b>5.2.1. Bases de Datos .....</b>	<b>25</b>
<b>5.2.2. Análisis Estadísticos .....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.2.1. Estadística descriptiva .....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.2.2. Análisis de varianza.....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.2.3. Análisis de series de tiempo.....</b>	<b>29</b>
<b>5.2.2.4. Agrupamiento de variables .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2.2.5. Análisis multivariado .....</b>	<b>31</b>
<b>5.2.3. Imágenes Satelitales.....</b>	<b>31</b>
<b>5.2.3.1. Preprocesamiento .....</b>	<b>32</b>
<b>5.2.3.2. Procesamiento .....</b>	<b>35</b>
<b>5.2.3.3. Postprocesamiento .....</b>	<b>37</b>
<b>5.2.3.4. Validación .....</b>	<b>39</b>
<b>5.3 Correlaciones temporales y espaciales de los factores ambientales.....</b>	<b>41</b>
<b>5.4 Definición de condiciones de referencia y estado de salud de las lagunas La Punta y La Brava.</b>	<b>42</b>
<b>5.5 Indicadores y variables a medir en el monitoreo de las lagunas La Punta y La Brava .....</b>	<b>43</b>
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
<b>6.1. Listado de factores ambientales que controlan o modelan las lagunas La Punta y La Brava.</b>	<b>44</b>

6.2.	Comportamiento temporal y espacial de los factores ambientales.....	48
6.2.1.	Variables forzantes .....	57
6.2.1.1.	Temperatura .....	57
6.2.1.2.	Precipitación .....	61
6.2.1.3.	Evapotranspiración .....	66
6.2.1.4.	Superficie de lagunas y de dilución salina .....	70
I.	Base de datos generada .....	71
II.	Base de datos Minera Escondida .....	89
6.2.1.5.	Niveles freáticos .....	91
6.2.1.6.	Niveles lagunares .....	99
6.2.1.7.	Conductividad Eléctrica.....	103
6.2.1.8.	Parámetros in situ de lagunas superficiales .....	108
6.2.1.9.	Macroelementos de lagunas superficiales .....	126
6.2.1.10.	Metales de lagunas superficiales .....	155
6.2.1.11.	Nutrientes de lagunas superficiales.....	181
6.2.1.12.	Otros parámetros de aguas superficiales .....	207
6.2.1.13.	Otros parámetros de sedimentos de lagunas superficiales.....	222
6.2.2.	Variables respuesta .....	251
6.2.2.1.	Fitobentos .....	252
I.	Densidad .....	257
II.	Riqueza .....	260
III.	Diversidad .....	263
6.2.2.2.	Fitoplancton .....	266
I.	Densidad .....	271
II.	Riqueza .....	274
III.	Diversidad .....	277
6.2.2.3.	Zoobentos .....	280
I.	Densidad .....	281
II.	Riqueza .....	286
III.	Diversidad .....	289
6.2.2.4.	Zooplancton .....	292

I.	Densidad .....	293
II.	Riqueza .....	296
III.	Diversidad .....	299
6.3.	Correlaciones temporales y espaciales de los factores ambientales.....	303
6.3.1.	Correlaciones variables abióticas .....	303
6.3.1.1	Nivel freático-Temperatura atmosférica y Precipitación .....	303
6.3.1.2.	Nivel lagunar-Temperatura atmosférica y precipitación .....	304
6.3.1.3.	Nivel freático – Nivel lagunar .....	307
6.3.1.4.	Nivel lagunar- Superficie lagunar .....	309
6.3.1.5.	Evapotranspiración y Precipitación- Nivel freático y Superficie .....	311
6.3.2.	Correlaciones variables de lagunas superficiales .....	313
6.3.2.1.	Correlaciones de variables químicas <i>in situ</i> .....	313
6.3.2.2.	Correlaciones de variables químicas de laboratorio .....	314
6.3.2.3.	Correlaciones de variables biológicas .....	319
6.3.2.4.	Análisis multivariado del sistema lagunar .....	324
6.4.	Definición de condiciones operacionales de referencia y estado de salud de las lagunas La Punta y La Brava. ....	330
6.4.1.	Variables abióticas: nivel freático, nivel lagunar, conductividad eléctrica superficial (limnímetros y reglillas) y superficie lagunar. ....	331
6.4.2.	Variables químicas <i>in situ</i> y de laboratorio .....	333
6.4.3.	Variables biológicas .....	345
7.	INDICADORES Y VARIABLES A MEDIR EN EL MONITOREO DE LAGUNAS .....	347
8.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	351
8.1.	Aguas subterráneas y otros factores abióticos.....	352
8.2.	Aguas superficiales.....	354
9.	REFERENCIAS .....	359
10.	ANEXOS .....	362

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1	Vértices de polígono área indirecta .....	22
Tabla 5-1	Estructura general de las bases de datos biótica y abiótica de LP-LB.....	26
Tabla 5-2	Especificaciones espectrales de las bandas de los satélites Landsat 4-5 TM, 7 ETM+.....	31

Tabla 5-3 Especificaciones espectrales de las bandas de los satélites Landsat 8 OLI .....	32
Tabla 5-4 Polígonos de recorte para estaciones verano e invierno, 1995 a 2019 .....	33
Tabla 5-5 Polígonos de recorte para las estaciones primavera y otoño, 1995 a 2019 .....	33
Tabla 5-6 Polígonos de recorte, 1985 a 1995.....	33
Tabla 5-7 Polígono de recorte Zona de Dilución Salina.....	37
Tabla 5-8 Interpretación de clases obtenidas mediante clasificación Isodata NDWI lagunas.....	38
Tabla 5-9 Interpretación referencial de las clases obtenidas mediante clasificación isodata para zona de dilución salina .....	39
Tabla 5-10 Fechas de imágenes usadas en validación. ....	39
Tabla 5-11 Interpretación del coeficiente de correlación de Spearman.....	42
Tabla 6-1 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes del componente C1 de hidrología .....	45
Tabla 6-2 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes del componente C4 de ecosistemas acuáticos. El doble asterisco (**) indica que las variables son comunes para todos los subcomponentes .....	46
Tabla 6-3 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes del componente C5 antrópico .....	46
Tabla 6-4 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes del componente C5 abiótico.....	46
Tabla 6-5 Criterios variables forzantes.....	47
Tabla 6-6 Criterios variables respuesta. ....	48
Tabla 6-7 Localización de estaciones meteorológicas y puntos de monitoreo de evapotranspiración .....	54
Tabla 6-8 Localización de los piezómetros.....	54
Tabla 6-9 Localización de limnímetros y niveles lagunares. ....	55
Tabla 6-10 Coordenadas de puntos de muestreo de calidad del agua.....	55
Tabla 6-11 Temperatura media anual para EM-SCL & EM-Rockwood, EM-Peine y EM-Tilopozo. ...	61
Tabla 6-12. Precipitación media anual.....	65
Tabla 6-13. Rango de p-valor para boxplot realizados en Figura 6-18.....	65
Tabla 6-14. Descripción estadística de evapotranspiración en puntos de monitoreo EVT-19 y EVT-20, período 2013 – 2019. ....	67
Tabla 6-15. Síntesis de descripción estadística de superficies lagunares y de dilución salina estimadas.....	71
Tabla 6-16. Disminución total y cambio porcentual de superficies lagunares estimadas desde 1985 a 2019.....	71
Tabla 6-17 Cuerpos de superficies lagunares profundas que permanecen 90 a 100% de las temporadas, desde 1985 a 2019.....	86
Tabla 6-18 Cambio relativo de niveles freáticos .....	92
Tabla 6-19 Descripción estadística de niveles freáticos.....	92
Tabla 6-20 Umbrales de niveles freáticos, Plan de Alerta Temprana .....	99
Tabla 6-21 Descripción estadística de niveles lagunares de La Punta y La Brava .....	99
Tabla 6-22 Cambio relativo de niveles lagunares .....	100
Tabla 6-23 Descripción estadística de conductividad eléctrica .....	104

Tabla 6-24 Cambio relativo de conductividad eléctrica.....	104
Tabla 6-25 Estadígrafos parámetros <i>in situ</i> .....	108
Tabla 6-26 Estadígrafos por laguna de parámetros <i>in situ</i> .....	109
Tabla 6-27 Diferencias en puntos de muestreo de temperatura.....	110
Tabla 6-28 Diferencias en puntos de muestreo de pH.....	113
Tabla 6-29 Diferencias en puntos de muestreo de Oxígeno Disuelto.....	116
Tabla 6-30 Diferencias en puntos de muestreo de Conductividad Eléctrica .....	119
Tabla 6-31 Estadígrafos macroelementos de lagunas superficiales .....	126
Tabla 6-32 Estadígrafos por laguna de macroelementos.....	127
Tabla 6-33 Diferencias en puntos de muestreo de Carbonato .....	128
Tabla 6-34 Diferencias en puntos de muestreo de calcio disuelto. ....	134
Tabla 6-35 Diferencias en puntos de muestreo de cloruro.....	137
Tabla 6-36 Diferencias en puntos de muestreo de magnesio disuelto.....	143
Tabla 6-37 Diferencias en puntos de muestreo de potasio disuelto .....	146
Tabla 6-38 Diferencias en puntos de muestreo de sodio disuelto.....	149
Tabla 6-39 Diferencias en puntos de muestreo de sulfato .....	152
Tabla 6-40 Estadígrafos de metales en lagunas superficiales.....	155
Tabla 6-41 Estadígrafos por laguna de metales .....	156
Tabla 6-42 Diferencias de puntos de muestro de arsénico disuelto.....	157
Tabla 6-43 Diferencias en puntos de muestreo de boro disuelto.....	160
Tabla 6-44 Estadígrafos de nutrientes en aguas superficiales .....	181
Tabla 6-45 Estadígrafos por laguna de nutrientes .....	182
Tabla 6-46 Diferencias en puntos de muestreo de amonio .....	183
Tabla 6-47 Diferencias en puntos de muestreo de ortofosfato.....	201
Tabla 6-48 Diferencias en puntos de muestreo de Alcalinidad .....	210
Tabla 6-49 Diferencias en puntos de muestreo de Sólidos Totales Disueltos .....	216
Tabla 6-50 Diferencias en puntos de muestreo de Sólidos Totales Suspendidos.....	219
Tabla 6-51 Estadígrafos otros parámetros químicos de lagunas superficiales.....	222
Tabla 6-52 Estadígrafos por laguna de metales .....	223
Tabla 6-53 Estadística descriptiva para las variables bióticas del Sistema La Punta-La Brava.....	251
Tabla 6-54 Composición taxonómica de fitobentos registrada. ....	252
Tabla 6-55 Estadígrafos de fitobentos por laguna .....	256
Tabla 6-56 Composición taxonómica de Fitoplancton registrada.....	266
Tabla 6-57 Estadígrafos de fitoplancton por laguna .....	270
Tabla 6-58 Composición taxonómica de zoobentos registrada en La Punta y La Brava. ....	280
Tabla 6-59 Estadígrafos de zoobentos por laguna .....	281
Tabla 6-60 Composición taxonómica de Zooplancton registrada.....	292
Tabla 6-61 Estadígrafos de zooplancton por laguna .....	293
Tabla 6-62 Matriz de correlación de Nivel Freático-Temperatura atmosférica, Nivel freático- Precipitación, 2013-2018 .....	303
Tabla 6-63 Matriz correlación Nivel lagunar -Temperatura atmosférica, Nivel freático-precipitación, 2013-2018 .....	305

Tabla 6-64 Matriz de correlación Nivel freático-Nivel lagunar, 2013-2018 .....	307
Tabla 6-65 Matriz de correlación Superficie lagunar y de Dilución salina - Nivel lagunar, 1996-2018 .....	309
Tabla 6-66 Matriz de correlación Evapotranspiración y Precipitación - Nivel freático y Superficies, 2013-2018 .....	311
Tabla 6-67 Matriz de correlación (Spearman) de parámetros químicos <i>in situ</i> , 2000-2018 (2010-2017 para salinidad), .....	313
Tabla 6-68 Matriz de correlación parámetros químicos, 2000-2018.....	314
Tabla 6-69 Matriz de correlación (Spearman) iones y metales, 2010-2016 .....	315
Tabla 6-70 Matriz de correlación Biótico, 2014-2019 .....	319
Tabla 6-71 Matriz de correlación Biótico-variables ambientales, 2014-2019 .....	321
Tabla 6-72 Valores de referencia de nivel freático .....	332
Tabla 6-73 Valores de referencia de nivel lagunar.....	332
Tabla 6-74 Valores de referencia de conductividad eléctrica en superficie de.....	333
Tabla 6-75 Valores de referencia de superficie lagunar La Punta y La Brava .....	333
Tabla 6-76 Valores de referencia de parámetros <i>in situ</i> La Punta y La Brava.....	334
Tabla 6-77 Valores de referencia de parámetros químicos de la columna de agua.....	335
Tabla 6-78 Valores de referencia de parámetros químicos de sedimentos .....	343
Tabla 6-79 Resumen comportamiento histórico de las comunidades fitobentónicas .....	345
Tabla 6-80 Resumen comportamiento histórico de las comunidades fitoplanctónicas.....	346
Tabla 6-81 Resumen comportamiento histórico de las comunidades zoobentónicas .....	346
Tabla 6-82 Resumen comportamiento histórico de las comunidades zooplanctónicas.....	346
Tabla 7-1 Localización de nuevos puntos de monitoreo propuestos .....	350

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Modelo hidrogeológico conceptual del sistema La Punta-La Brava.....	19
Figura 4-1 Área de estudio de lagunas La Punta y La Brava.....	22
Figura 4-2 Cuencas y subcuencas, constitución de derechos de agua.....	23
Figura 5-1 Diagrama de flujo metodológico aplicado a las imágenes satelitales .....	32
Figura 5-2 Polígonos de recorte de índice NDWI .....	36
Figura 5-3 Parámetros técnicos de clasificación no supervisada Isodata .....	38
Figura 6-1 Localización de piezómetros según componente espacial .....	49
Figura 6-2 Limnímetros y monitoreo de niveles lagunares según componente espacial.....	51
Figura 6-3 Estaciones meteorológicas y puntos de monitoreo de evapotranspiración.....	52
Figura 6-4 Puntos de Muestreo de Datos Acuáticos.....	53
Figura 6-5 Temperatura media mensual y diaria, 2009 a 2019, EM-SCL y EM-Rockwood .....	57
Figura 6-6 Temperatura media mensual EM-Tilopozo, 2010 a 2017.....	58
Figura 6-7 Temperatura media mensual EM-Peine, 1985 a 2019 .....	59
Figura 6-8 Boxplot de temperaturas mensuales de EM-Peine, EM-Rockwood, SCL y EM-Tilopozo. 60	
Figura 6-9 Precipitación acumulada mensual 1997 a 2019, EM-SCL y EM-Rockwood .....	62

Figura 6-10 Precipitación acumulada mensual, 2010 a 2017, EM-Tilopozo .....	63
Figura 6-11 Precipitación acumulada mensual, 1985 a 2019, EM-Peine .....	64
Figura 6-12 Boxplot tipo violín de precipitaciones (mm/mes) según estacionalidad para las estaciones meteorológicas: EM-SCL & EM-Rockwood, EM-Tilopozo y EM-Peine. Fuente: Elaboración propia .....	66
Figura 6-13 Evapotranspiración en punto de monitoreo EVT-19, 2013-2019. Fuente: Elaboración propia .....	67
Figura 6-14 Evapotranspiración en punto de monitoreo EVT-20, 2013-2019. ....	68
Figura 6-15 Boxplot, monitoreo de evapotranspiración en EVT-19 y EVT-20, 2013-2019 .....	69
Figura 6-16 Superficie lagunar total: (A) verano e invierno, (B) otoño y primavera, 1985- 2019. ...	73
Figura 6-17 Superficie lagunar profunda: (A) verano e invierno, (B) otoño y primavera, 1985- 2019 .....	77
Figura 6-18 Recurrencia de superficie lagunar total en invierno, 1985 a 2019, La Punta y La Brava. ....	81
Figura 6-19 Recurrencia de superficie lagunar profunda en invierno, 1985 a 2019, La Punta y La Brava.....	82
Figura 6-20 Recurrencia de superficie lagunar profunda en verano, 1985 a 2019, La Punta y La Brava.....	83
Figura 6-21 Recurrencia de superficie lagunar profunda en otoño, 1985 a 2019, La Punta y La Brava.....	84
Figura 6-22 Recurrencia de superficie lagunar profunda en primavera, 1985 a 2019, La Punta y La Brava.....	85
Figura 6-23 Superficie de agua en zona de dilución salina (borde sur del núcleo del Salar),1985- 2019, (A): verano e invierno, (B): otoño y primavera .....	87
Figura 6-24 Superficie lagunar profunda y zona de dilución salina profunda, invierno y verano 2002 -2018 .....	90
Figura 6-25 Niveles freáticos: (A, B) Norte o aguas abajo, (C, D) Borde lagunar, Sur o aguas arriba, (E, F) Sur lejano (G, H). Fuente: Elaboración propia .....	94
Figura 6-26 Piezómetros del Plan de Alerta Temprana, 2013 a 2019.....	98
Figura 6-27 Niveles lagunares: (A, B) Borde y (C) Sur o aguas arriba.....	101
Figura 6-28 Conductividad eléctrica: (A, B) Borde, (C, D) Sur o aguas arriba, (E) Sur lejano .....	105
Figura 6-29 Conductividad eléctrica en laguna La Brava (E) Sur lejano .....	106
Figura 6-30 Análisis temporal y espacial de temperatura del agua de las Laguna La Punta y La Brava .....	111
Figura 6-31 Análisis temporal de temperatura del agua por estación de muestreo y por empresa .....	112
Figura 6-32 Análisis temporal y espacial de pH de las Laguna La Punta y La Brava.....	114
Figura 6-33 Análisis temporal de pH por estación de muestreo y por empresa .....	115
Figura 6-34 Análisis temporal y espacial de oxígeno disuelto de las Laguna La Punta y La Brava..	117
Figura 6-35 Análisis temporal de oxígeno disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	118
Figura 6-36 Análisis temporal y espacial de conductividad de las Laguna La Punta y La Brava .....	121
Figura 6-37 Análisis temporal de conductividad eléctrica por estación de muestreo y por empresa .....	122

Figura 6-38 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava .....	124
Figura 6-39 Análisis temporal de salinidad por estación de muestreo y por empresa .....	125
Figura 6-40 Análisis temporal y espacial de carbonato de las Laguna La Punta y La Brava .....	129
Figura 6-41 Análisis temporal de carbonato por estación de muestreo y por empresa .....	130
Figura 6-42 Análisis temporal y espacial de bicarbonato de las Laguna La Punta y La Brava .....	132
Figura 6-43 Análisis temporal de bicarbonato por estación de muestreo y por empresa .....	133
Figura 6-44 Análisis temporal y espacial de calcio disuelto de las Laguna La Punta y La Brava .....	135
Figura 6-45 Análisis temporal de calcio disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	136
Figura 6-46 Análisis temporal y espacial de cloruro de las Laguna La Punta y La Brava .....	138
Figura 6-47 Análisis temporal de cloruro por estación de muestreo y por empresa .....	139
Figura 6-48 Análisis temporal y espacial de fluoruro de las Laguna La Punta y La Brava .....	141
Figura 6-49 Análisis temporal de fluoruro por estación de muestreo y por empresa .....	142
Figura 6-50 Análisis temporal y espacial de magnesio disuelto de las Laguna La Punta y La Brava .....	144
Figura 6-51 Análisis temporal de magnesio disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	145
Figura 6-52 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava .....	147
Figura 6-53 Análisis temporal de potasio disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	148
Figura 6-54 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava .....	150
Figura 6-55 Análisis temporal de sodio disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	151
Figura 6-56 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava .....	153
Figura 6-57 Análisis temporal de sulfato por estación de muestreo y por empresa .....	154
Figura 6-58 Análisis temporal y espacial de Arsénico disuelto de las Laguna La Punta y La Brava .....	158
Figura 6-59 Análisis temporal de arsénico disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	159
Figura 6-60 Análisis temporal y espacial de boro disuelto de las Laguna La Punta y La Brava .....	161
Figura 6-61 Análisis temporal de boro disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	162
Figura 6-62 Análisis temporal y espacial de cadmio disuelto de las Laguna La Punta y La Brava .....	164
Figura 6-63 Análisis temporal de cadmio disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	165
Figura 6-64 Análisis temporal y espacial de cobre disuelto de las Laguna La Punta y La Brava .....	167
Figura 6-65 Análisis temporal de cobre disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	168
Figura 6-66 Análisis temporal y espacial de hierro disuelto de las Laguna La Punta y La Brava .....	170
Figura 6-67 Análisis temporal de hierro disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	171
Figura 6-68 Análisis temporal y espacial de litio disuelto de las Laguna La Punta y La Brava .....	173
Figura 6-69 Análisis temporal de litio disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	174
Figura 6-70 Análisis temporal y espacial de plomo disuelto de las Laguna La Punta y La Brava .....	176
Figura 6-71 Análisis temporal de plomo disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	177
Figura 6-72 Análisis temporal y espacial de zinc disuelto de las Laguna La Punta y La Brava .....	179
Figura 6-73 Análisis temporal de zinc disuelto por estación de muestreo y por empresa .....	180
Figura 6-74 Análisis temporal y espacial de amonio de las Laguna La Punta y La Brava .....	184
Figura 6-75 Análisis temporal de amonio por estación de muestreo y por empresa .....	185
Figura 6-76 Análisis temporal y espacial de fósforo de las Laguna La Punta y La Brava .....	187
Figura 6-77 Análisis temporal de fósforo por estación de muestreo y por empresa .....	188
Figura 6-78 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava .....	190
Figura 6-79 Análisis temporal de materia orgánica por estación de muestreo y por empresa .....	191

Figura 6-80 Análisis temporal y espacial de nitrógeno de las Laguna La Punta y La Brava .....	193
Figura 6-81 Análisis temporal de nitrógeno por estación de muestreo y por empresa .....	194
Figura 6-82 Análisis temporal y espacial de nitrato de las Laguna La Punta y La Brava .....	196
Figura 6-83 Análisis temporal de nitrato por estación de muestreo y por empresa .....	197
Figura 6-84 Análisis temporal y espacial de nitrito de las Laguna La Punta y La Brava .....	199
Figura 6-85 Análisis temporal de nitrito por estación de muestreo y por empresa .....	200
Figura 6-86 Análisis temporal y espacial de ortofosfato de las Laguna La Punta y La Brava .....	202
Figura 6-87 Análisis temporal de ortofosfato por estación de muestreo y por empresa .....	203
Figura 6-88 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava .....	205
Figura 6-89 Análisis temporal de ortofosfato por estación de muestreo y por empresa .....	206
Figura 6-90 Análisis temporal y espacial de clorofila 'a' de las Laguna La Punta y La Brava .....	208
Figura 6-91 Análisis temporal de clorofila 'a' por estación de muestreo y por empresa .....	209
Figura 6-92 Análisis temporal y espacial de alcalinidad de las Laguna La Punta y La Brava .....	211
Figura 6-93 Análisis temporal de alcalinidad por estación de muestreo y por empresa .....	212
Figura 6-94 Análisis temporal y espacial de turbidez de las Laguna La Punta y La Brava .....	214
Figura 6-95 Análisis temporal de turbidez por estación de muestreo y por empresa .....	215
Figura 6-96 Análisis temporal y espacial de sólidos totales disueltos de las Laguna La Punta y La Brava .....	217
Figura 6-97 Análisis temporal de sólidos totales disueltos por estación de muestreo y por empresa .....	218
Figura 6-98 Análisis temporal y espacial de sólidos totales suspendidos de las Laguna La Punta y La Brava .....	220
Figura 6-99 Análisis temporal de sólidos totales suspendidos por estación de muestreo y por empresa .....	221
Figura 6-100 Análisis temporal y espacial de arsénico sedimento de las Laguna La Punta y La Brava .....	225
Figura 6-101 Análisis temporal de arsénico sedimento por estación de muestreo y por empresa .....	226
Figura 6-102 Análisis temporal y espacial de boro sedimento de las Laguna La Punta y La Brava .....	228
Figura 6-103 Análisis temporal de boro sedimento por estación de muestreo y por empresa .....	229
Figura 6-104 Análisis temporal y espacial de cadmio sedimento de las Laguna La Punta y La Brava .....	231
Figura 6-105 Análisis temporal de cadmio sedimento por estación de muestreo y por empresa .....	232
Figura 6-106 Análisis temporal y espacial de cobre sedimento de las Laguna La Punta y La Brava .....	234
Figura 6-107 Análisis temporal de cobre sedimento por estación de muestreo y por empresa .....	235
Figura 6-108 Análisis temporal y espacial de hierro sedimento de las Laguna La Punta y La Brava .....	237
Figura 6-109 Análisis temporal de hierro sedimento por estación de muestreo y por empresa .....	238
Figura 6-110 Análisis temporal y espacial de materia orgánica sedimento de las Laguna La Punta y La Brava .....	240
Figura 6-111 Análisis temporal de materia orgánica sedimento por estación de muestreo y por empresa .....	241

Figura 6-112 Análisis temporal y espacial de fósforo sedimento de las Laguna La Punta y La Brava .....	243
Figura 6-113 Análisis temporal de fósforo sedimento por estación de muestreo y por empresa. ....	244
Figura 6-114 Análisis temporal y espacial de plomo sedimento de las Laguna La Punta y La Brava .....	246
Figura 6-115 Análisis temporal de plomo sedimento por estación de muestreo y por empresa ..	247
Figura 6-116 Análisis temporal y espacial de zinc sedimento de las Laguna La Punta y La Brava..	249
Figura 6-117 Análisis temporal de zinc sedimento por estación de muestreo y por empresa.....	250
Figura 6-118 Densidad de fitobentos en La Punta y La Brava.....	258
Figura 6-119 Análisis temporal y espacial de densidad fitobentos de las Laguna La Punta y La Brava .....	259
Figura 6-120 Riqueza de fitobentos en La Punta y La Brava. ....	261
Figura 6-121 Análisis temporal y espacial de riqueza de fitobentos de las Laguna La Punta y La Brava.....	262
Figura 6-122 Diversidad de fitobentos en La Punta y La Brava.....	264
Figura 6-123 Análisis temporal y espacial de diversidad de fitobentos de las Laguna La Punta y La Brava.....	265
Figura 6-124 Densidad de fitoplancton en La Punta y La Brava.....	272
Figura 6-125 Análisis temporal y espacial de densidad de fitoplancton de las Laguna La Punta y La Brava.....	273
Figura 6-126 Riqueza de fitoplancton en La Punta y La Brava .....	275
Figura 6-127 Análisis temporal y espacial de riqueza de fitoplancton de las Laguna La Punta y La Brava.....	276
Figura 6-128 Diversidad de fitoplancton en La Punta y La Brava.....	278
Figura 6-129 Análisis temporal y espacial de diversidad de fitoplancton de las Laguna La Punta y La Brava.....	279
Figura 6-130 Densidad de zoobentos (ind/m <sup>2</sup> ) en La Punta y La Brava. ....	282
Figura 6-131 Densidad de zoobentos (ind/L) en La Punta y La Brava. ....	283
Figura 6-132 Análisis temporal y espacial de densidad de zoobentos de las Laguna La Punta y La Brava.....	284
Figura 6-133 Análisis temporal y espacial de densidad de zoobentos de las Laguna La Punta y La Brava.....	285
Figura 6-134 Riqueza de zoobentos en La Punta y La Brava.....	287
Figura 6-135 Análisis temporal y espacial de riqueza de zoobentos de las Laguna La Punta y La Brava.....	288
Figura 6-136 Diversidad de zoobentos en La Punta y La Brava.....	290
Figura 6-137 Análisis temporal y espacial de diversidad de zoobentos de las Laguna La Punta y La Brava.....	291
Figura 6-138 Densidad en zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava.....	294
Figura 6-139 Análisis temporal y espacial de densidad de zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava.....	295
Figura 6-140 Riqueza en zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava. ....	297

Figura 6-141 Análisis temporal y espacial de riqueza de zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava.....	298
Figura 6-142 Diversidad en zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava.....	300
Figura 6-143 Análisis temporal y espacial de diversidad de zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava.....	301
Figura 6-144 Variación temporal de: (A) niveles freáticos sur, (B) niveles freáticos y lagunares en borde, (C) niveles freáticos norte, (D) precipitación e índice multivariado de ENOS (Multivariate ENSO Index; MEI), (E) temperatura y evapotranspiración, 2013-2019. Fuente: Elaboración propia .....	306
Figura 6-145 Variación temporal de (A) niveles freáticos sur, (B) niveles lagunares y superficie lagunar total, 2013-2019. Fuente: Elaboración propia .....	308
Figura 6-146 Variación temporal de superficie lagunar total, precipitación, niveles lagunar de (A) La Punta y (B) de La Brava, 1996-2019. Fuente: Elaboración propia.....	310
Figura 6-147 Variación temporal de (A) precipitación, (B) superficie lagunar y de dilución salina, (C) temperatura y evapotranspiración, 1996-2019. Fuente: Elaboración propia. ....	312
Figura 6-148 Variación temporal de (A) salinidad, sodio y cloruro (B) pH y oxígeno disuelto, (C) temperatura y conductividad eléctrica, 1996-2019. Fuente: Elaboración propia .....	317
Figura 6-149 Variación temporal de (A) sólidos totales disueltos y alcalinidad (B) sulfato y carbonato, (C) precipitación y bicarbonato, 1996-2019. Fuente: Elaboración propia .....	318
Figura 6-150 Variación temporal de (A) diversidad fitoplancton (B) diversidad fitobentos, (C) diversidad zooplancton, (D) diversidad zoobentos 2014-2020. Fuente: Elaboración propia; Diversidad: índice de Shannon .....	323
Figura 7-1 Puntos de nuevos puntos de monitoreo propuestos. ....	348

## 1. RESUMEN EJECUTIVO

Se determinaron los factores ambientales que controlan o modelan las lagunas La Punta y La Brava. Para ello se utilizó como información base los resultados del proyecto “Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico para la Cuenca del Salar de Atacama”, financiado por el Ex Comité de Minería no Metálica de CORFO y ejecutado por AMAKAIK SpA. En él se definieron los componentes del modelo ecológico y las variables de estado, forzantes y controladoras para el Salar de Atacama para cada componente, siguiendo los trabajos de Bilotta & Brazier, 2008; Jones et al., 2011 y Soetaert & Herman, 2009. Una vez definidas las variables que aplican para este estudio, fueron seleccionadas las variables/factores ambientales que cumplieran con las condiciones de: i) que constituyan componentes relevantes del ecosistema, ya sea por su rol forzante de procesos o estructurador de hábitat; ii) que sea medido o monitoreado; iii) que tenga alguna conexión con las fuentes de presión.

Los factores ambientales propuestos para diagnosticar la situación ambiental de las lagunas La Punta y La Brava. son: a) Precipitación; b) Temperatura atmosférica; c) Evapotranspiración; d) Nivel freático (piezométrico); e) Nivel lagunar f) Temperatura de aguas superficiales; g) Superficie lagunar (Área de espejo de agua); h) Concentración de nutrientes en aguas superficiales; i) Concentración de macroelementos en aguas superficiales; j) Concentración de metales en aguas superficiales; k) Oxígeno disuelto en aguas superficiales; l) Conductividad/Salinidad en aguas superficiales y m) pH en aguas superficiales.

Se incluyen dentro de este análisis los subcomponentes biológicos a modo de variables respuesta, ya que además pueden ser considerados estructuradores de hábitat. Esto porque los distintos grupos biológicos pueden modificar concentraciones de elementos en el ambiente (nutrientes, oxígeno, etc) y las interacciones entre los distintos grupos pueden modular la dinámica ecosistémica de las lagunas. Las comunidades consideradas son: I) Microorganismos extremófilos; II) Fitobentos; III) Fitoplancton; IV) Zoobentos; V) Zooplancton y VI) Plantas Vasculares Acuáticas. Estas variables son analizadas en función de los parámetros de densidad, riqueza y diversidad, para cada grupo biológico.

Los resultados más importantes obtenidos a través de los análisis estadísticos para las variables abióticas son que, para niveles lagunares y niveles freáticos, las variaciones a lo largo de los períodos analizados 2013 a 2019, 2000 a 2018, 2007 a 2018, 2015 a 2019, 2016 a 2019 y 1995 a 2018, son mayoritariamente de aumento o disminución leves, de rango de valor absoluto entre 0,005 m a 0,07 m. Existiendo diferencias por sectores lagunares, y por período histórico o reciente de medición. Para los niveles freáticos del sector aguas arriba de la laguna La Brava, se estima en dos piezómetros las mayores disminuciones totales de -0,155 m para el período 2013 a 2019 y -0,072 m para el período 2000 a 2018 mientras que, para dos puntos de monitoreo de

niveles lagunares de la laguna La Punta se estima la mayor disminución total de -0,213 m, y el mayor aumento total de 0,035 m durante el período 1995 a 2018.

Para la variable conductividad eléctrica en superficie, se estimó una tendencia de disminución en dos puntos de monitoreo de ambas lagunas para el período histórico 1998 a 2018 y de aumento en la laguna La Punta desde 2016 a 2019.

Además, al comparar la conductividad de ambas lagunas, se obtuvieron valores significativamente mayores en La Brava que en La Punta, para el período histórico 1998 a 2018.

También se consideró en este estudio la variable evapotranspiración, estimándose una tendencia de disminución durante el período reciente, desde 2013 a 2019.

Uno de los factores relevantes del sistema lagunar La Punta y La Brava es su superficie, las que fueron estimadas a través de análisis de imágenes satelitales, durante el período histórico 1985 a 2019, obteniéndose que los valores analizados por estación (verano, invierno, primavera y otoño) presentan una tendencia de disminución significativa. Una tendencia de disminución también se obtiene para la superficie lagunar más dilución salina profunda entre 2002 y 2018, generada por Minera Escondida.

Como factor modulador de las variables mencionadas, se consideró relevante la temperatura atmosférica, analizándose los datos disponibles de las estaciones meteorológicas de Peine desde 1985 a 2019, Rockwood-SCL desde 2009 a 2019 y Tilopozo desde 2010 a 2017. Para las tres estaciones se obtuvo estadísticamente una tendencia de aumento significativo de temperatura, estimándose para EM- Rockwood-SCL un aumento de 0,108 °C por año y para EM-Tilopozo en 0,032 °C por año, durante los períodos señalados.

Mientras que, para los datos de precipitación se evidencia una tendencia de disminución significativa en EM-Tilopozo durante el período 2010 a 2017.

Respecto de las lagunas superficiales, se destaca que las series temporales de los parámetros *in situ*, muestran que los valores para todas las variables son sostenidamente mayores para La Brava, pero que consecuentemente, a partir de 2016/2017, los valores de La Punta se tornan mayores con una tendencia de incremento, exceptuando al oxígeno disuelto que disminuye. En tanto, las series temporales de sólidos totales disueltos, carbonatos y sulfatos también tienden a ser mayores en La Brava, aunque con la clara distinción de la variable alcalinidad, cuyos valores son mayores para La Punta. Lo más notable de este conjunto de series es la progresiva (abrupta en el caso de bicarbonato) disminución de concentración en torno a 2004-2006 hacia adelante. Esto coincide con la disminución en la tasa de precipitaciones entre 2004 y 2010. A partir de 2010

algunas concentraciones tienden a aumentar levemente en concordancia con precipitaciones más frecuentes e intensas.

Respecto de las correlaciones entre variables químicas se destacan los parámetros *in situ*, mostrando correlaciones significativas entre variables tales como salinidad y conductividad, temperatura y oxígeno disuelto, entre otros que refuerzan la utilización de estos parámetros para determinar la calidad de las lagunas ya que se relacionan además con los procesos biológicos que se desarrollan al interior de cada laguna. Los macroelementos muestran las más altas correlaciones significativas y positivas al interior de las lagunas.

El zooplancton no registra diferencias significativas entre lagunas para los parámetros de densidad, riqueza y diversidad. Un factor importante a considerar en este tipo de análisis es la baja cantidad de entidades taxonómicas registradas en general y el nivel de resolución taxonómica menor respecto de otros grupos como las microalgas, lo que se refleja en comunidades aparentemente más homogéneas. Por su parte, el zoobentos es una comunidad, que al igual que el zooplancton, presenta baja cantidad de entidades taxonómicas, las que son determinadas al nivel de familia o género, por lo que también se muestra una composición homogénea. En este caso, el zoobentos muestra una disminución de la diversidad, forzado principalmente por una disminución muy importante de la densidad de individuos pese a un aumento en su riqueza.

En el caso de las microalgas, tanto en la comunidad bentónica como planctónica, domina la clase Bacillariophyceae (diatomeas). Este grupo es muy diverso, particularmente en sistemas hipersalinos de altura, lo que es registrado por los monitoreos en el sistema La Punta y La Brava. Cabe señalar que este grupo se encuentra también formado parte de los microorganismos extremófilos, considerados como la principal comunidad biológica estructuradora de hábitat en este tipo de ecosistemas. El fitoplancton, al igual que el zooplancton, no registra diferencias significativas entre lagunas para ninguno de los parámetros considerados, sin embargo, el fitobentos presenta diferencias significativas para la riqueza taxonómica y diversidad entre las lagunas La Punta y La Brava. Cabe señalar que en general la tendencia de las series temporales de las comunidades microalgales es de disminución para la diversidad del fitobentos y la riqueza y diversidad del fitoplancton en ambas lagunas. A pesar de esta tendencia significativa el segundo semestre de 2018 y el primer semestre de 2019 particularmente el fitoplancton muestra un interesante aumento respecto del resto de la serie temporal.

Un número importante de altas correlaciones significativas fueron registradas entre los parámetros de los cuatro grupos biológicos evaluados. Tanto las correlaciones positivas como negativas dan cuenta de las interacciones de depredación y competencia descritas para estos sistemas, así como de la posible asociación con la presencia de comunidades extremófilas que dominan en la Laguna La Brava.

De los análisis multivariados, el ACP entrega un primer componente principal (explica el 19,2% de varianza) que está siendo influenciado por procesos relacionados con fluctuaciones en temperatura y evapotranspiración, de modo que el nivel de las lagunas es un importante modulador de las variables físicoquímicas a medida que responde a los cambios intraanuales e interanuales de temperatura. En tanto, se podría postular que procesos biológicos asociados al nivel de las lagunas, podrían estar modulando las variables segregadas por el segundo componente principal, el que es más complejo de descifrar ya que solo explica un 15.1% de la varianza y separa variables sin una relación directa. Esto porque el desarrollo biológico se asocia en general a valores negativos del segundo componente principal. Por su parte, del CCA es posible concluir para las comunidades biológicas que tanto la densidad, diversidad y riqueza del fitobentos y fitoplancton se ven favorecidos por condiciones “invernales”, o de mayor nivel agua, mientras que condiciones tipo-verano favorece la densidad, diversidad y riqueza del zooplancton.

Para la definición de indicadores y variables a medir en el monitoreo de las lagunas se consultó la guía de Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA (Sea, 2012), en la cual se definen los principales aspectos que se requieren para el entendimiento de un sistema hidrogeológico. A partir de esto se identificaron los componentes que deben ser caracterizadas y la información de campo que debe ser levantada y monitoreada. Es así como, se propone la instalación de nuevas estaciones meteorológicas, recolección de muestras de aguas subterráneas y aguas lluvia para el análisis isotópico, y nuevos puntos de medición de evapotranspiración.

En el caso de las lagunas superficiales se propone continuar el monitoreo en los puntos históricos para aumentar la serie temporal existente, con el objetivo de robustecer el análisis. Por otra parte, se recomienda mantener el set de variables y sus respectivos parámetros ya que, si bien este estudio determina mayor relevancia de algunos (ej. parámetros *in situ*), una vez finalizados los análisis todos se confirman como factores forzantes: temperatura, concentración de nutrientes, concentración de macroelementos, concentración de metales, oxígeno disuelto, conductividad/salinidad y pH. Además, las variables respuesta, correspondientes a los grupos biológicos, deben mantenerse en evaluación, considerando las comunidades extremófilos de particular interés por su relevancia ecológica y su sensibilidad como sensor de los cambios que fueron detectados en este estudio, mas no pudieron ser correlacionados con estas comunidades por falta de información cuantitativa y sistemática.

Se entregan valores de referencia para el monitoreo de todos los factores ambientales abióticos propuestos, utilizando criterios estadísticos y juicio de experto. En tanto, para las variables abióticas se propone utilizar la estructura comunitaria como referencia.

Se concluye del análisis que las lagunas presentan cambios temporales significativos en los factores ambientales propuestos y en las comunidades biológicas evaluadas, reflejando en la actualidad una menor calidad ambiental respecto del rango temporal histórico considerado para cada variable.

## **2. ANTECEDENTES GENERALES**

La cuenca del Salar de Atacama, con un área de aproximadamente 12.400 km<sup>2</sup>, corresponde al mayor depósito salino del país (Figura 2-1). Se ubica a 2.300 msnm en la provincia del Loa, de la región de Antofagasta y es una cuenca pre altiplánica que se encuentra inserta dentro del sistema hidrográfico Pacífico Seco, caracterizada por sus desiertos marginales costeros. El clima predominante es el árido, en sus subtipos desérticos y estepárico, con temperaturas anuales que oscilan entre los -5°C y los 28°C.

El Salar de Atacama está constituido por dos grandes unidades: el núcleo o “core” de 1.100 km<sup>2</sup> de superficie, de 900 m de espesor y con una zona marginal de limos salinos de unos 2.000 km<sup>2</sup> de superficie. El núcleo está formado por halita (NaCl), impregnado con una salmuera de cloruro de sodio, rica en litio, potasio, magnesio y boro; mientras que la zona marginal consiste en una fina capa de sedimentos salinos ricos en sulfato y especialmente en yeso.

Hidrográficamente el Salar de Atacama se caracteriza por tener una recarga continua de agua subterránea proveniente del extremo este, por la infiltración de la precipitación que se produce en el altiplano y solo esporádicamente algunos cursos superficiales llegan a sus bordes. Por el norte desembocan los ríos San Pedro y Vilama, cuyas aguas infiltran rápidamente.

Las lagunas salobres ubicadas en la zona marginal este se agrupan en los sistemas La Punta-La Brava, Peine, Aguas de Quelana, Soncor y Tilopozo, además de la laguna Tebenquiche, de la que hay poca información disponible. Las características ambientales de estas lagunas resaltan por su alta radiación solar, por sus fluctuaciones extremas de temperatura, típicas de ambientes desérticos, gran evaporación neta, producción de agua hipersalina y altas concentraciones de arsénico debido a eventos volcánicos. Todas estas condiciones contribuyen al desarrollo de comunidades de microorganismos adaptados para soportar condiciones extremas.

Los ecosistemas acuáticos de la cuenca del salar de atacama poseen una biota muy rica y diversa, desarrollándose en el fondo de ellas comunidades microalgales y de invertebrados bentónicos, además de complejos y únicos sistemas como son los formados por microorganismos extremófilos, tapetes microbianos y

microbialitos, por ejemplo. En tanto, en la columna de agua existen especies características como artemias o copépodos.

El Salar de Atacama es uno de los principales yacimientos de litio del mundo y la extracción de este elemento proviene de la explotación de salmueras naturales por dos grandes empresas privadas: SQM Salar S.A. y Albemarle. Así, este importante auge minero ha conllevado también a la creciente explotación del recurso hídrico en la cuenca, no solo a partir de las extracciones de las dos empresas señaladas, sino que también de las empresas Minera Zaldívar Ltda. y Minera Escondida Ltda., las que se encuentran emplazadas en el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT), que desemboca en el borde sur del salar. Este complejo sistema hídrico interconectado superficial y subterráneamente alimenta vegas, bofedales, lagunas y salares, representando una base de equilibrio para la red de drenaje que da vida a oasis como Peine, Toconao y Socaire, junto con comunidades que ancestralmente han habitado este territorio.

### **2.1. Sistema La Punta - La Brava**

La agrupación de lagunas en sistemas responde al objetivo de reducirlos conceptualmente a unidades manejables para su estudio. De esta forma, el sistema La Punta-La Brava se encuentra formada por las lagunas La Punta y La Brava, tal como su nombre lo indica, las que son objeto de estudio de este proyecto.

Respecto a la dinámica de las aguas superficiales y subterráneas del Sistema La Punta-La Brava, los resultados y caracterizaciones realizadas por el CEA (2015) establecen que:

- Se evidencia una diferencia en el comportamiento de la salmuera y del acuífero dulce-salobre.
- Los niveles de la salmuera del núcleo muestran un descenso sostenido en el tiempo, sin un comportamiento estacional, y con una respuesta asociada a eventos de precipitación.
- El acuífero dulce-salobre no muestra una tendencia en la variación de su nivel, presenta un comportamiento estacional, y tampoco muestra una respuesta asociada a eventos de precipitación.
- Las lagunas muestran comportamientos distintos dependiendo de la ubicación, teniéndose zonas que muestran un comportamiento estacional bien marcado (forzado por la alta evaporación de la zona), y otras que no muestran cambios, las que se consideran con ocurrencia de afloramientos locales permanentes.
- Tal comportamiento determina marcados gradientes espaciales y temporales en cuanto a salinidad y conductividad eléctrica, variables estructurales al ecosistema.
- Las diferentes partes (o sub-cuerpos de agua) que componen a cada laguna poseen desniveles considerables, definiendo de buena manera la dirección de los flujos en el subsistema.

Los autores proponen un modelo conceptual del funcionamiento del Subsistema La Punta-La Brava, el cual se muestra en la Figura 2-1. Allí se evidencia como la alimentación del acuífero dulce-salobre local (en la zona de las lagunas) dependerá del aporte realizado por flujos provenientes desde el extremo Sur del Salar, y ubicados en zonas de mayor altitud de la cuenca. Estas aguas afloran en parte en la zona de las Vegas de Tilopozo, sin generar una canalización que las lleve hasta las lagunas. Así, las lagunas se alimentan de afloramientos locales forzados por la presencia de la interfase salina que se sitúan principalmente en la orilla sur de las lagunas (CEA, 2015).

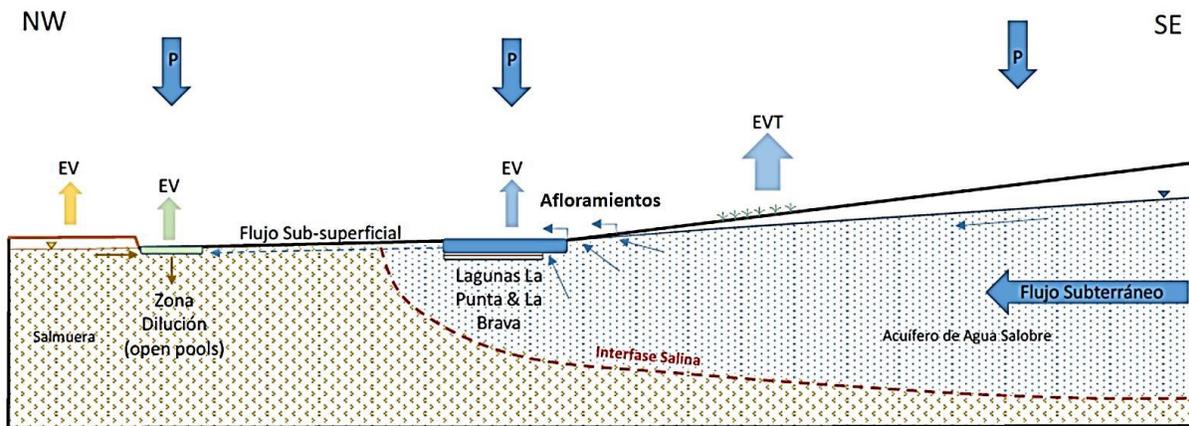


Figura 2-1 Modelo hidrogeológico conceptual del sistema La Punta-La Brava

Fuente: CEA, 2015

Este subsistema de lagunas se caracteriza principalmente por presentar valores de conductividad específica y salinidad variables. La conductividad muestra variaciones espaciales entre las lagunas, aumentando desde la laguna La Punta hacia La Brava, así como importantes variaciones temporales, con mayores valores en verano, probablemente asociado a mayores tasas de evaporación. Los valores observados están por sobre los 30 mS/cm. Por otra parte, y en relación con la variable conductividad, los sólidos totales disueltos al igual que la conductividad evidencian la misma tendencia. El pH es básico promediando un valor de 8, observándose valores más altos en la laguna La Brava (Amakaik, 2018).

El estudio de modelo ecológico conceptual para la cuenca del Salar de Atacama y la generación de la base de datos de ecosistemas acuáticos para el mismo, fue desarrollado por Amakaik en proyectos financiados por el Comité de Minería No Metálica de CORFO, durante los años 2017 y 2018. Como parte de estos estudios se recopiló información relevante para el sistema La Punta-La Brava, sin embargo, no toda la información estuvo disponible oportunamente, de modo que no fue considerada.

En el estudio mencionado, el sistema La Punta-La Brava fue caracterizado biológicamente para los componentes fitobentos, fitoplancton, microorganismos extremófilos, zoobentos, zooplancton y plantas vasculares acuáticas.

Respecto a los microorganismos extremófilos los resultados obtenidos muestran que el sistema La Punta-La Brava presenta una riqueza total de 18 *taxa*. Se registra la presencia de *Acidobacteria*, *Bacteroidetes*, *Caldithrix*, *Chloroflexi*, *Chlamydiae*, *Firmicutes*, *Lentisphaerae*, *Planctomycetes*, *Proteobacteria*, *Spirochaetes*, *Thermi*, *Verrucomicrobia*, *Acetothermia*, *Bacteroidetes*, *Cyanobacteria*, *Crenarcheota*, *Chloroflexi*, *Deinococcus-Thermus*, *Euryarcheota*, *Firmicutes*, *Planctomycetes*, *Proteobacteria*, *Spirochaetes*, *Thermi* y *Verrucomicrobia* (Farias et al., 2017).

En este mismo estudio, el fitobentos en el sector La Punta registró un total de 73 *taxa*, presentando una alta dominancia del género *Denticula* (diatomea) que alcanza el 68%. En tanto, en el sector La Brava, se encuentra un total de 84 *taxa*, presentando también una alta dominancia del género *Denticula* (diatomea) llegando a un 94%. Respecto del fitoplancton registrado en el sector La Punta, se tiene un total de 85 *taxa*, presentando nuevamente una alta dominancia del género *Denticula* con el 83%. En tanto, el fitoplancton de La Brava registra un total de 100 *taxa*, presentando también una alta dominancia del género *Denticula* (88%).

En la laguna La Punta la composición zooplanctónica está principalmente estructurada por copépodos de los órdenes Calanoida y Harpacticoidea, incluyendo a los calanoideos *Boeckella sp.*, *Boeckella bergi* y *Boeckella titicacae* y los harpacticoideos de la familia Canthocamptidae como *Attheyella sp.* Otro grupo importante fue el crustáceo branquiópodo *Artemia franciscana*. De manera aislada se identificaron ejemplares de los grupos Acari, gasterópodos de las familias Hydrobiidae, Cochliopidae y Planorbidae, rotíferos correspondientes a *Cephalodella sp.* y larvas de insectos dípteros de las familias Ceratopogonidae, Chironomidae, Dolichopodidae, Empididae y Ephyridae. La tendencia es la dominancia de copépodos del género *Boeckella* seguido por copépodos Canthocamptidae o bien *Attheyella sp.* (AMAKAIK, 2018).

Los resultados del estudio para la laguna La Brava indican que la composición zooplanctónica está representada por copépodos de los órdenes Calanoida, Cyclopoida y Harpacticoidea, incluyendo a los calanoideos *Boeckella sp.* y los harpacticoideos de la familia Canthocamptidae como *Attheyella sp.* Otro grupo importante es el crustáceo branquiópodo *Artemia franciscana*. De manera aislada se identificaron ejemplares de los grupos Acari, gasterópodos de la familia Cochliopidae, rotíferos correspondientes a *Cephalodella sp.* y larvas de insectos dípteros de las familias Ceratopogonidae, Chironomidae, Dolichopodidae, Empididae, Ephyridae y Elmidae. Los *taxa* ampliamente dominante en laguna La Brava (de septiembre 2008 a verano 2016) fueron los copépodos de la familia Canthocamptidae, incluyendo a *Attheyella sp.* Luego en dominancia se encontraron los copépodos Cyclopoida, los calanoideos *Boeckella sp.* y el branquiópodo *Artemia franciscana*.

Las mayores riquezas totales se observaron en primavera y verano (entre 1 taxón y 7 taxa, respectivamente). Cabe señalar que *A. franciscana* fue encontrada a partir de julio de 2014, siendo dominante en invierno de 2015 junto con *Boeckella sp.*, desplazando a los copépodos Canthocamptidae como dominantes.

La composición zoobentónica de laguna La Punta muestra dominancia principalmente de individuos de la familia Canthocamptidae, Ceratopoginidae y Ephyridae, seguido de organismos del género *Hyaella* y *Heleobia*. En la laguna La Brava es dominada principalmente por individuos de la familia Canthocamptidae, Ceratopoginidae y Ephyridae, seguido de organismos de la familia Chironomidae y del género *Hyaella*.

Para las plantas acuáticas, en el sector La Punta se tiene un total de cuatro especies entre las que se encuentran la hidrófita *Ruppia filifolia*, y las helófitas *Sarcocornia fruticosa*, *Puccinellia frigida* y *Triglochin palustris*. En el sector La Brava, se registró un total de cuatro especies entre las que se encuentran la hidrófita *Ruppia filifolia*, y las helófitas *Sarcocornia fruticosa*, *Puccinellia frigida* y *Triglochin palustris* (AMAKAIK, 2018).

### 3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

#### 3.1. Objetivo general

Diagnosticar la situación ambiental de las lagunas La Punta y La Brava, Salar de Atacama, en base a la información histórica existente.

#### 3.2. Objetivos específicos

- Recopilar la información existente de las lagunas y generar una base de datos bibliográfica.
- Generar un diagnóstico de los componentes ambientales seleccionados para las lagunas y su área de influencia.
- Establecer indicadores para monitoreo de los componentes ambientales definidos

### 4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio (Figura 4-1), comprende las lagunas La Punta y La Brava, localizadas en la zona marginal sur del Salar de Atacama (576.554 E/ 737.555.595 S, Datum WGS-84), Región de Antofagasta.

Tabla 4-1 Vértices de polígono área indirecta

Vértices	Coordenadas UTM (Datum WGS84)	
	Este (m)	Norte (m)
1	573.516,216	7.377.604,584
2	579.389,978	7.377.604,584
3	579.389,978	7.373.085,491
4	573.505,633	7.373.096,075

Fuente: Elaboración propia

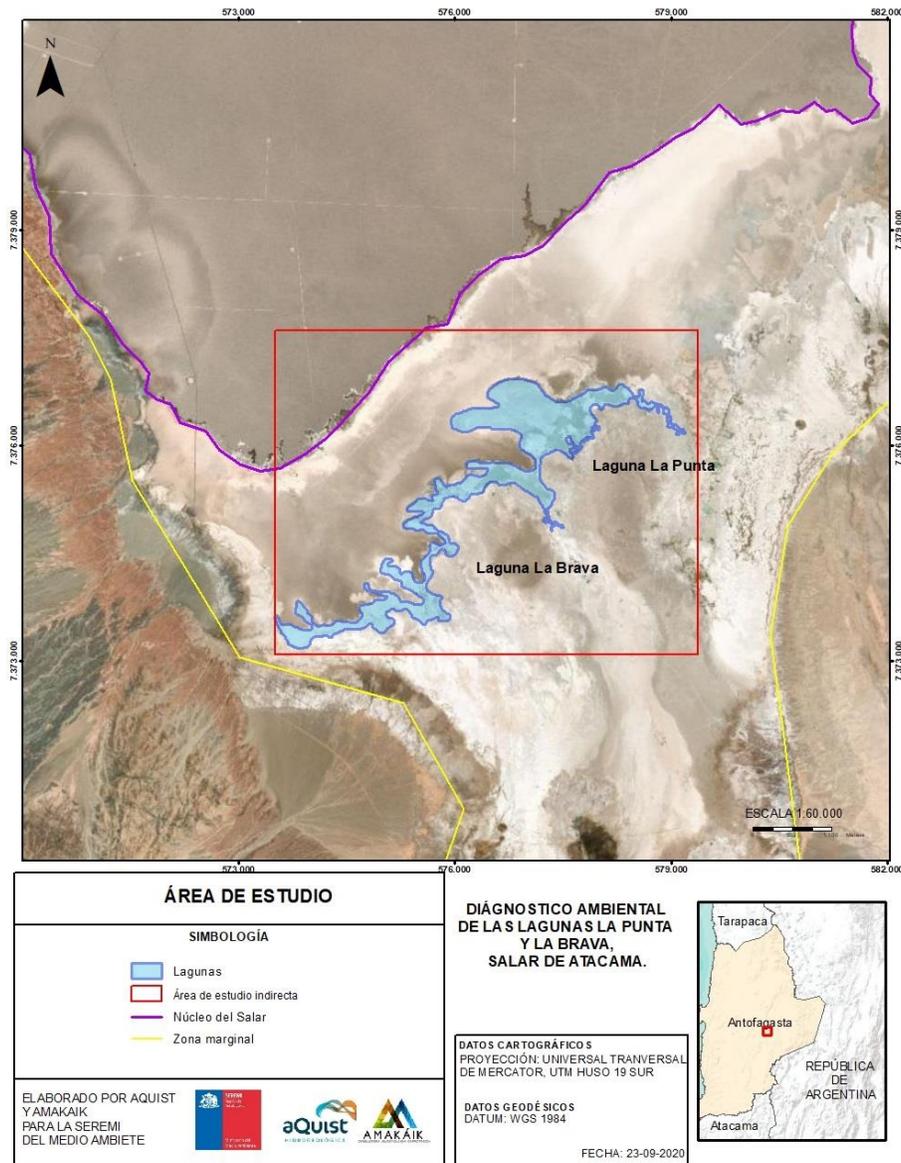


Figura 4-1 Área de estudio de lagunas La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

El área de estudio indirecta (Figura 4-1), corresponde a un polígono rectangular alrededor de las lagunas La Punta y La Brava, construido a partir de los vértices de

Tabla 4-1 y de extensión 2658,3133 ha.

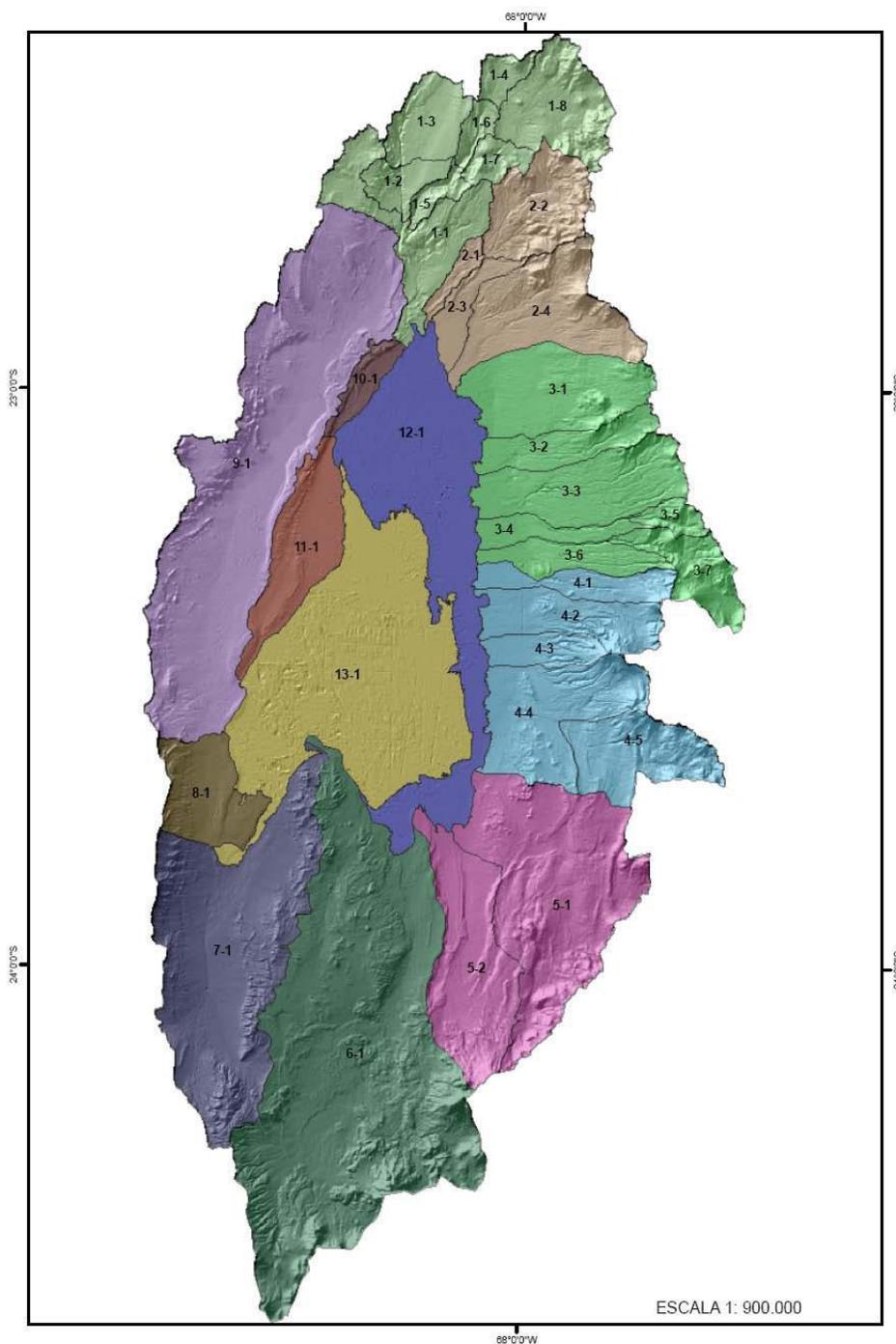


Figura 4-2 Cuencas y subcuencas, constitución de derechos de agua.

Fuente: DGA/GCF, 2010

Cabe señalar que según la delimitación de cuencas de derechos de aprovechamiento de aguas 2010, realizado por la Dirección General de Aguas (DGA), las lagunas La Punta y La Brava, se localizan en la cuenca 12, subcuenca 1 (DGA/GCF,2010).

## 5. METODOLOGÍA

A continuación, se detallan las metodologías asociadas a los tres objetivos específicos del proyecto: 1. Listado de factores ambientales que controlan o modelan las lagunas La Punta y La Brava; 2. Comportamiento temporal y espacial de los factores ambientales; 3. Correlaciones temporales y espaciales de los factores ambientales; 4. Definición de condiciones de referencia y estado de salud de las lagunas La Punta y La Brava. 5. Establecer indicadores para monitoreo de los factores ambientales definidos.

En general, para un mejor análisis espacial de los datos se procedió a generar la cartografía base (ArcGis 10.4), representando los puntos de muestreo, pozos y estaciones meteorológicas. Dichos mapas se generaron con datum WGS84 Huso 19 Sur.

### 5.1. Listado de factores ambientales que controlan o modelan las lagunas La Punta y La Brava.

En el proyecto “Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico para la Cuenca del Salar de Atacama”, financiado por el Ex Comité de Minería no Metálica de CORFO y ejecutado por AMAKAIK SpA, se definen los componentes del modelo y las variables de estado, forzantes y controladoras para el Salar de Atacama para cada componente. Los componentes son 6: C1 Recurso Hídrico; C2 Flora y Vegetación; C3 Fauna Terrestre; C4 Ecosistemas Acuáticos; C5 Antrópico y C6 Abiótico. De estos 6 componentes, se consideran aplicables a este estudio, de acuerdo con la delimitación de área de influencia directa e indirecta del Sistema La Punta y La Brava, las variables pertenecientes a los componentes C1, C4, C5 y C6.

Para definir los distintos tipos de variables se consideraron los trabajos de (Bilotta & Brazier, 2008; Jones et al., 2011; Soetaert & Herman, 2009). En particular, se consideraron las siguientes definiciones operacionales:

Variables de estado: Son aquellos componentes o variables que nos interesan estudiar. Estas pueden corresponder a los componentes y subcomponentes definidos por los expertos, así como también a variables de naturaleza estocástica que se encuentran anidadas en cada componente y/o subcomponente. Entenderemos como variable de estado a aquella variable “modelable” y que sufre cambios en relación a las

variables forzantes y controladoras. Es decir, aquel atributo que puede ser cuantificado y representado en un modelo matemático que da cuenta de su variación temporal, espacial o espacio temporal.

Variables o funciones forzantes: Son aquellos factores externos importantes que regulan el sistema y que impactan en las variables de estado. En este sentido, pueden ser atributos externos cuyas escalas espaciales y temporales características sean de gran magnitud, como el efecto de fenómenos climáticos de gran escala como el fenómeno El Niño-Oscilación Sur, o bien pueden ser factores externos con una escala y ámbito de acción mucho más específico, como la acción de actividades humanas en superficie muy localizadas del paisaje.

Variable controladora: Es aquella variable que da cuenta de manera importante de los cambios en las variables forzantes y de estado, habitualmente es una variable latente, i.e. no es medible directamente, pero si se podría definir en relación a posibles estructuras de relaciones (correlaciones). Ejemplo de ello podría ser el análisis de variables hidrogeológicas en conjunto con variables climáticas y meteorológicas, para determinar eventuales relaciones que puedan dar evidencia de efectos causales.

Una vez definidos los componentes a considerar y sus respectivas variables de estado, forzantes y controladoras para este estudio, fueron seleccionadas las variables/factores ambientales que cumplieran con las condiciones de: a) que constituyan componentes relevantes del ecosistema, ya sea por su rol forzante de procesos o estructurador de hábitat; b) que sea medido o monitoreado; y c) que tenga alguna conexión con las fuentes de presión.

## **5.2. Comportamiento temporal y espacial de los factores ambientales.**

### **5.2.1. Bases de Datos**

Para analizar el comportamiento temporal y espacial de los factores ambientales seleccionados, se llevó a cabo la integración de la información disponible en dos bases de datos, la primera contando con información acerca de parámetros biológicos y físicoquímicos localizados en el área de influencia directa (en las lagunas La Punta y La Brava propiamente tal) y una segunda Base de Datos que cuenta con información abiótica de niveles freáticos, niveles lagunares, conductividad eléctrica en superficie de piezómetros y en lagunas, precipitación, temperatura, evapotranspiración, superficie lagunar y superficie de agua en zona de dilución salina. Se determinaron entidades metodológicas, geográficas, temporales y biológicas y abióticas, según corresponda, compuestas por atributos (columnas), que a través de los registros de datos o puntos de muestreos (filas), caracterizan una unidad espaciotemporal en un sistema, relacionadas en una tabla de doble entrada.

La estructura de la Base de Datos de La Punta y La Brava comparte algunos atributos con la Base de Datos de Ecosistemas Acuáticos ya finalizada en el marco del proyecto Estudio de un Modelo Ecológico Conceptual de la Cuenca del Salar de Atacama (Amakaik, 2018), por ejemplo, los atributos espaciales de código de punto de muestreo y unidad hidrogeológica.

Para un mejor uso de la base de datos, se generó información en relación a la fuente y ubicación espacial de los datos que no se presentan de manera literal en la fuente original de información, pero si posible de obtener a partir de ésta. Por ejemplo, se agregaron los atributos de nombre del proyecto, unidad ejecutora, contraparte, año de muestreo, entre otros. Más específicamente, las entidades de “Ubicación espacial” y “Fuente de información” integran datos de metadata que fueron obtenidos para la generación de las Bases de Datos, mientras que el resto de las entidades reúne información obtenida en terreno o gabinete durante la ejecución de cada proyecto, cuya metodología de muestreo se encuentra descrita en profundidad en cada estudio al que hacen referencia.

La metodología por la cual se obtuvieron los atributos se detalla en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para ambas Base de datos.

Tabla 5-1 Estructura general de las bases de datos biótica y abiótica de LP-LB

Entidad	Entidad	Atributo	Descripción*
ID		Código Único	Código único que involucra la (Abreviatura Mandante) + (Estación) + (Abreviatura de la Estacionalidad) + (Año). Ejemplo: 1_A_F34_Sep_2013
Fuente de la información	De donde se obtuvo la Información	Proyecto	Título del proyecto de inversión. Ejemplo. Modificaciones_y_Mejoramiento_del_Sistema_de_Pozas_de_Evaporación_Solar_en_el_Salar_de_Atacama
		Tipo informe	Tipo de informe analizado. (Ejemplo: Línea Base, Monitoreo histórico etc.) Ejemplo: Linea_Base_Adenda_4
		Documento	Anexo o capítulo en donde se encontró la información. Ejemplo: Apéndice_C: Línea_de_Base_Flora_y_Fauna_Acuática
		Titular del proyecto	Nombre de la empresa dueña del proyecto. Ejemplo: Albemarle_(ex_Rockwood_Lithium)
		Código titular	Abreviatura del nombre de la empresa mandante. Ejemplo: Albemarle: A
		Empresa consultora	Nombre de la empresa consultora encargada de realizar el o los estudios. Ejemplo: AT-EME_S.A

Entidad	Entidad	Atributo	Descripción*
Ubicación espacial	Información geográfica del sitio muestreado	Región	Región administrativa donde se ubica el sitio muestreado. Ejemplo: Antofagasta
		Cuenca	Cuenca en la que se encuentra el sitio de estudio. Ejemplo: Salar_de_Atacama
		Zona Hidrogeológica	Zona hidrogeológica definida por empresa AMPHOS. Estas corresponden: "Zona marginal acuífero (15) y Este y Sur (6). Estas están definidas en la hoja Unidades Hidrogeológicas de esta misma planilla  Es posible encontrar seis tipos de UH: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Núcleo</li> <li>• Oeste</li> <li>• S/I</li> <li>• Zona Marginal Norte</li> <li>• Zona Marginal Sur hasta Núcleo</li> <li>• Zona Oeste</li> <li>• Zona Sur (7)</li> <li>• Zona Sur (8)</li> <li>• Zona Sur (9)</li> </ul>
		Unidad Hidrogeológica	Zona hidrogeológica definida por empresa AMPHOS. Estas están definidas en la hoja Unidades Hidrogeológicas de esta misma planilla Excel. Estas corresponden: "UH1, UH2, UH3 y s/i (sin información)".
		Estación, Hábitat o Transecto (T) *	Nombre de la estación u hábitat según ha sido definido por el Estudio o Declaración de Impacto Ambiental. Se encuentra diversidad de códigos.
		Estación homóloga*	Nombre que recibió inicialmente la estación de muestreo, la cual, fue modificada posteriormente con un nuevo nombre.
		UTM E inicio	Coordenada Este del inicio transecto en metros WGS84 UTM del sitio de muestreo.
		UTM N inicio	Coordenada Norte del inicio transecto en metros WGS84 UTM del sitio de muestreo.
		UTM E término	Coordenada Este del término transecto en metros WGS84 UTM del sitio de muestreo (si procede).
		UTM N término	Coordenada Norte del término transecto en metros WGS84 UTM del sitio de muestreo (si procede).
Ubicación temporal	Información temporal del sitio de muestreo	Día inicio muestreo*	Día de inicio de toma de muestras para cada campaña. Expresado en número del 1 al 31.
		Día término muestreo*	Día final de toma de muestras para cada campaña. Expresado en número del 1 al 31 (si procede).

Entidad	Entidad	Atributo	Descripción*
		Mes año	Mes y año en que se realizó la toma de muestras. El mes se expresa escribiendo las tres primeras letras del mes, seguido de guion bajo y el año. Ejemplo: Sept_2013.
		Estacionalidad	Temporada en la que se realizó el muestreo (invierno, verano, otoño, primavera)

Los atributos destacados con \* no se utilizan en la base de datos abiótica, en cambio se agregan en la entidad Ubicación espacial los atributos Punto de Muestreo, Hábitat/Ambiente, Sistema Franjas, Sistema y Sector, mientras que en la entidad Ubicación temporal se agrega el atributo fecha. Fuente: Elaboración propia.

Posterior a la integración de los datos, se procedió a la depuración de los mismos, eliminando caracteres que dificulten su utilización por otros softwares. Por lo tanto, de la base de datos fueron extraídas las tildes, los espacios entre caracteres. Las letras las "ñ" fueron reemplazadas por "n" y los espacios por guion bajo "\_".

Cabe señalar que en la base de datos de parámetros abióticos se realizó una delimitación del área de estudio indirecta, obteniendo los siguientes cuatro componentes espaciales o zonas: Norte, Borde lagunar, Sur y Sur lejano. Sin embargo, esta división no aplica a los datos de lagunas superficiales por concentrarse las estaciones de muestreo en la zona Borde lagunar y solo algunas estarían ubicadas en la zona Sur.

## 5.2.2. Análisis Estadísticos

### 5.2.2.1. Estadística descriptiva

Con las bases de datos depuradas fueron realizadas las pruebas estadísticas utilizando el programa Python 3.8.3, mediante las librerías Scikit-learn, Statistics y SciPy. Primeramente, se realizó una exploración de la información recopilada usando estadística descriptiva, mostrando esta información en tablas y gráficamente, indicando las medias, varianzas, máximos, mínimos, percentiles y distribución de cada factor ambiental seleccionado en el tiempo, además de indicar la dispersión de los datos de  $\pm 1 \delta$  (1 desviación estándar).

Luego, para todas las variables correspondientes a los distintos factores ambientales propuestos como indicadores se realizaron pruebas de normalidad paramétrica (test de Shapiro-Wilks) o no-paramétrico (test de Kolmogorov-Smirnov), según el tamaño del conjunto. Si el p-valor de la prueba estadística fue superior a 0,05, entonces se rechazó la hipótesis nula de una distribución normal, y se consideraron aproximaciones no-paramétricas para esas variables.

### 5.2.2.2. Análisis de varianza

Con lo anterior evaluado, para determinar diferencias significativas entre conjuntos de datos se realizó un t-test si los conjuntos en cuestión cumplen los requisitos de normalidad y homocedasticidad entre conjuntos. En caso de que no se cumplieran estos requisitos, se aplicó el test no-paramétrico de Mann-Whitney (MWtest). Se debe

aclarar que el t-test determina diferencia significativa de medias aritméticas, mientras que MWtest determina diferencia significativa de medianas. Este procedimiento se utilizó cada vez que se comparan específicamente dos conjuntos de datos, fueran estos puntos de muestreo, estaciones del año, lagunas, sectores, etc.

Para determinar diferencias significativas entre más de dos conjuntos de datos, se realizó un análisis de varianza. Siguiendo la misma revisión de cumplimiento de requisitos paramétricos, se optó por un ANOVA de una vía si los requisitos se cumplían (normalidad, homocedasticidad e independencia entre los conjuntos), y en el caso negativo, se realizó un test de Kruskal-Wallis (KWtest). Con el fin de determinar qué pares de conjuntos, entre la multiplicidad de conjuntos, difieren significativamente, se realizó una prueba *post-hoc* según el análisis de varianza aplicado. Estos son, test de Tukey que complementa al ANOVA, y el test de Dunn (Dtest) que complementa al KWtest. Los conjuntos analizados deberían compartir la misma ventana temporal para ser comparados.

#### **5.2.2.3. Análisis de series de tiempo**

Con respecto a tendencias y modelos de ajuste, la evolución histórica de cada variable fue evaluada y para esto se descompuso su serie de tiempo mediante un modelo multiplicativo, cuando fue posible. Un modelo aditivo de descomposición fue utilizado en conjuntos que presentaron ceros (ej. precipitaciones). La descomposición multiplicativa encuentra el valor promedio del conjunto, las fluctuaciones estacionales, el ruido (relacionado con outliers) y la tendencia. Para cada punto en el tiempo, cada observación equivale al resultado de la multiplicación de estos elementos. La descomposición aditiva suma los elementos en vez de multiplicarlos. Este procedimiento permitió aislar la tendencia de la serie temporal, depurada de oscilaciones de periodicidad anual (estacionalidad) y de ruido aleatorio. La curva obtenida como tendencia según esta descomposición fue referida como 'la tendencia' para el resto del informe.

En conjunto con lo anterior, se realizó una regresión lineal de mínimos cuadrados (ajuste lineal) sobre la curva de tendencia obtenida desde la descomposición anterior. Aplicar el ajuste lineal a la curva de tendencia en vez de a la serie temporal de datos brutos permite obtener un mayor coeficiente de determinación ( $r^2$ ) ya que se reduce la dispersión atribuida a fluctuaciones estacionales. Esto además permite evaluar el progreso anual de la variable analizada. Se calculó el  $r^2$  del ajuste y luego se verificó si la pendiente era distinta a cero mediante el test de Wald (Wtest). Si el p-valor del Wtest es  $<0,05$  entonces la pendiente del ajuste difiere significativamente de cero.

Ajustes con  $r^2$  menores a 0,1 fueron descartados, de modo que se considera que estas variables no tienen una evolución lineal para el período evaluado. Si bien un  $r^2 = 0,1$  se puede considerar como bajo, este valor sirve como límite inferior para determinar si se puede otorgar un sentido de linealidad a la serie temporal analizada.

Esto se vuelve relevante al comparar distintas series temporales. Al menos un 10% de determinación de la tendencia por un modelo lineal y una pendiente significativamente distinta a cero fueron los criterios usados para todas las series temporales para sugerir, con una significancia estadística, si una variable ha tenido una tendencia de aumento (pendiente positiva) o de descenso (pendiente negativa) en el tiempo, bajo un modelo lineal.

Si una serie de tiempo cumplía con los requisitos de presentar un coeficiente de determinación  $>0,10$  y un p-valor para el Wtest  $<0,05$ , se prosiguió a calcular un valor de cambio relativo. Esto se estima a partir del valor del ajuste lineal en tiempo final menos el valor del ajuste lineal en el tiempo inicial. A partir del cambio relativo fue posible calcular el cambio relativo porcentual, que es el cambio relativo dividido por valor del ajuste lineal en tiempo inicial, luego multiplicado por 100.

No se encontró evidencia de aplicabilidad de otros ajustes no-lineales (exponencial, logístico o logarítmico) con un  $r^2$  considerable ( $>0,1$ ) para ninguna variable. La utilización de un modelo polinómico requeriría un sustento teórico, lo cual excede los objetivos de este estudio exploratorio.

#### **5.2.2.4. Agrupamiento de variables**

Según la escala de análisis, algunas variables se agruparon temporal o espacialmente para los análisis ya mencionados. En la dimensión espacial, se aclara que para las variables de temperatura y de precipitación, las observaciones de la estación meteorológica SCL se agruparon con las observaciones de la estación meteorológica Rockwood debido a que éstas fueron operadas por el mismo mandante (Albemarle), distando espacialmente por solo unos metros, pero difiriendo en el período de operación, por lo que se puede considerar espacialmente como una misma estación meteorológica. Así también para los análisis de series temporales las variables químicas y biológicas descritas a partir de 6.2.1.7 y 6.2.2, los puntos de muestreo fueron agrupados según se ubican en Laguna La Punta o Laguna La Brava.

Debido a que distintas variables presentan distinta resolución temporal de observaciones, en un esfuerzo de poder aplicar el mismo procedimiento analítico, y como preparación para los análisis de correlación que se detallarán más adelante, la obtención de la curva de tendencia fue realizada con el promedio estacional (estación del año), de modo que fueron obtenidos cuatro valores por año. Cuando no se realizó un agrupamiento de datos, se detalla el mandante a que corresponde el conjunto de datos. También se debe aclarar que los valores de percentiles aquí expuestos se calculan a partir del conjunto de datos brutos (sin promediar).

En el caso de las variables de lagunas superficiales no se utilizó la división del área de influencia por sectores (norte, borde, sur y sur alejado). Esto porque no aplica a la distribución de puntos de muestreo ubicados en las lagunas La Punta y La Brava para el monitoreo de parámetros físicoquímicos y bióticos.

En relación la base de datos acuática (biótica), la densidad de zoobentos se encontró en dos unidades, ind/mm<sup>2</sup> y ind/L, mismo caso que el fitobentos que presentó resultados en cél/mm<sup>2</sup> y cél/mm<sup>3</sup>, por ello se procedió a realizar dos análisis para cada uno de estos componentes.

### 5.2.2.5. Análisis multivariado

Fueron realizados análisis de componentes principales (ACP) con las series promediadas estacionalmente, estandarizadas (z-score), y verificando que presentaran mediciones continuas a lo largo del período que se analiza. Esto se realizó usando todas las variables disponibles para el período de 2000 a 2017 donde se dispone de la mayoría de las variables continuas. Se realizó además el análisis para el período de 2014 a 2018 para poder incorporar las variables biológicas.

Se realizó un análisis de correspondencia canónica (CCA) usando el mismo período donde se disponía de mediciones de variables biológicas (2014- 2018). Las variables biológicas fueron incorporadas como variables respuestas en este análisis. Cada serie fue promediada estacionalmente y estandarizada (z-score).

### 5.2.3. Imágenes Satelitales

Para el análisis de percepción remota, se utilizaron imágenes satelitales multiespectrales de resolución espacial media de 30 x 30 metros (tamaño de píxel), del satélite Landsat 4-5 (sensor TM), Landsat 7 (sensor ETM+) y Landsat 8 (sensor OLI), utilizando dos bandas (verde e infrarroja cercana NIR) (Tabla 5-2 y Tabla 5-3), a una resolución temporal de 4 imágenes por año, una por estación, durante el período 1985 a 2019.

Las especificaciones espectrales de las bandas de los satélites Landsat 4-5 TM, 7 ETM+ y 8 OLI se detallan en la Tabla Tabla 5-2 y Tabla 5-3.

Tabla 5-2 Especificaciones espectrales de las bandas de los satélites Landsat 4-5 TM, 7 ETM+

Banda	Espectro	4-5 TM		7 ETM+	
		Longitud de onda (µm)	Tamaño de píxel (m)	Longitud de onda (µm)	Tamaño de píxel (m)
1	Azul	0,45-0,52	30 x 30	0.45 - 0.52	30 x 30
2	Verde	0,52-0,60	30 x 30	0.52 - 0.60	30 x 30
3	Rojo	0,63-0,69	30 x 30	0.63 - 0.69	30 x 30
4	Infrarrojo Cercano (NIR)	0,76-0,90	30 x 30	0.76 - 0.90	30 x 30
5	onda corta infrarroja (SWIR) 1	1,55-1,75	30 x 30	1.55 - 1.75	30 x 30
6	Infrarrojo térmico	10,4-12,5	120 x 120	10.40 - 12.50	60 x 60

7	onda corta infrarroja (SWIR) 2	2,08-2,35	30 x 30	2.08 - 2.35	30 x 30
8	Pancromática	N/A	N/A	0.52 - 0.90	15 x 15

Fuente: Geomática Ambiental, 2020

Tabla 5-3 Especificaciones espectrales de las bandas de los satélites Landsat 8 OLI

Banda	Espectro	8 OLI	
		Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Tamaño de píxel (m)
1	Ultra azul (costero / aerosol)	0.43 - 0.45	30 x 30
2	Azul	0.45 - 0.51	30 x 30
3	Verde	0.53 - 0.59	30 x 30
4	Rojo	0.64 - 0.67	30 x 30
5	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30 x 30
6	Onda corta infrarroja (SWIR) 1	1.57 - 1.65	30 x 30
7	Onda corta infrarroja (SWIR) 2	2.11 - 2.29	30 x 30
8	Pancromática	0.52 - 0.90	15 x 15
9	Cirrus	1.36 - 1.38	30 x 30

Fuente: Geomática Ambiental, 2020

A continuación, se sintetiza la metodología aplicada a las imágenes satelitales en el siguiente esquema:

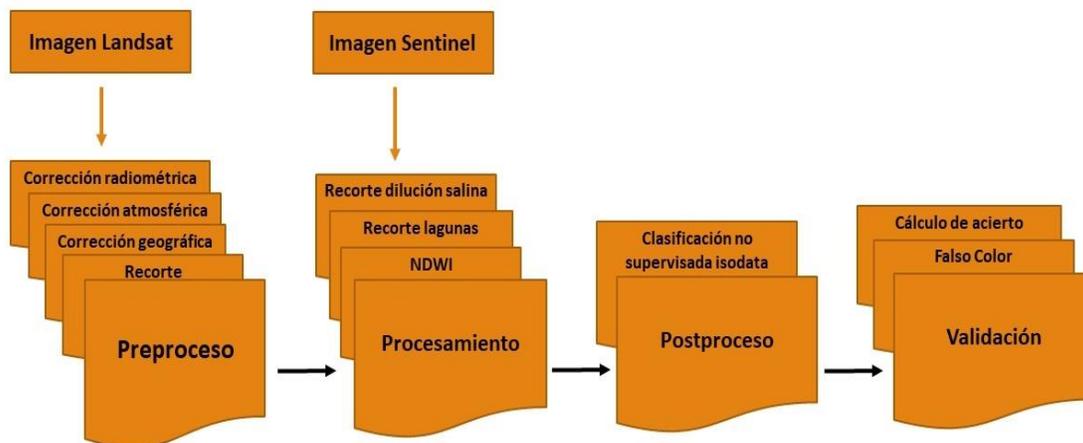


Figura 5-1 Diagrama de flujo metodológico aplicado a las imágenes satelitales

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.3.1. Preprocesamiento

En primer lugar, fueron descargadas imágenes satelitales del sensor Landsat 4 a 8, obtenidas del portal de descarga gratuito <https://glovis.usgs.gov/>. Durante la selección de las imágenes, se consideró visualmente que tuviera nubosidad escasa y que correspondieran a la temporalidad seleccionada.

Posteriormente, se realizó un recorte a las 2 bandas de las imágenes satelitales, verde e infrarrojo cercano, que están en formato TIFF, a través del proceso “cortar raster por extensión”, usando el software QGIS 3.1, el que se realizó según orden de estaciones. Se debe señalar que las imágenes satelitales landsat en el área de estudio están por defecto georreferenciadas con latitud norte, por lo que los polígonos de recorte también poseen esta latitud.

Desde el 2010 el sensor Landsat 7 sufrió un quiebre en parte de su lente, razón por la que aparecen líneas negras de error en algunas tomas espaciales. Por esto, se revisó cada imagen y se dibujó un polígono de recorte que excluyera el error.

El polígono utilizado para verano e invierno 1995-2019 se señala en la Tabla 5-4, sin embargo, para algunas imágenes se escogieron otras extensiones de recorte específicas, que se ajustaban de mejor manera.

El segundo grupo de imágenes a recortar, fueron las de las estaciones primavera y otoño, las cuales se decidió minimizar su extensión de recorte, para optimizar el espacio y procesos de los de archivos trabajados. Los vértices de los polígonos de recorte se señalan en la Tabla 5-5. Además, se decidió agregar 10 años de procesamiento de imágenes satelitales, desde 1985 a 1994, para este tercer grupo se utilizó el polígono de recorte de la tabla Tabla 5-5.

Tabla 5-4 Polígonos de recorte para estaciones verano e invierno, 1995 a 2019

Tiempo	Vértices	Coordenadas UTM (Datum WGS84)	
		Este (m)	Norte (m)
1995-2009	1	562390,860	-2640697,541
	2	598412,566	-2598022,145
2010-2014	1	570734,999	-2628164,999
	2	580514,999	-2620034,999
2015-2019	1	571514,999	-2628824,999
	2	581234,999	-2621624,999

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-5 Polígonos de recorte para las estaciones primavera y otoño, 1995 a 2019

Tiempo	Vértices	Coordenadas UTM (Datum WGS84)	
		Este (m)	Norte (m)
1995-2009	1	562390,860	-2640697,541
	2	598412,566	-2598022,145
2010-2014	1	571627,620	-2621089,472
	2	580506,533	-2629802,940
2015-2019	1	571186,432	-2629472,049
	2	579734,454	-2621310,067

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-6 Polígonos de recorte, 1985 a 1995

Tiempo	Vértices	Coordenadas UTM (Datum WGS84)	
		Este (m)	Norte (m)
1985-1994	1	562390,860	-2640697,541
	2	598412,566	-2598022,145

Fuente: Elaboración propia

Las bandas cortadas se sometieron a corrección geográfica para cambiar la latitud de sus coordenadas de norte a sur, dado que el portal de descarga por defecto entrega las imágenes de este huso como 19 Norte. La reproyección se realizó en QGIS 3.1 a través del proceso “combar (reproyectar)” por lotes, usando el método de remuestreo “vecino más cercano”.

Posteriormente, las 2 bandas recortadas fueron sometidas a procesamiento digital de correcciones radiométricas y atmosféricas, con el fin de reducir errores provenientes de interferencias, las cuales pueden ser producto del ángulo de captura y alteraciones en el movimiento del satélite, o bien el efecto de las partículas presentes en la atmósfera, entre otros (Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico 2016 de Albemarle elaborado por CEDREM, 2017).

La corrección radiométrica consiste en la conversión de los valores de píxeles desde números digitales (ND) a unidades de radiancia espectral absoluta ( $W / (m^2 *sr * \mu m)$ ). Este proceso se utiliza como medio de calibración para disminuir la falta de uniformidad en los valores digitales debido a efectos producidos por errores sistemáticos en el sensor, tales como la contaminación de partículas en el plano focal de éste, las que pueden manifestarse en forma de manchas y bandas en las imágenes. Esta conversión proporciona uniformidad para la comparación de datos en una sola escena o entre imágenes, adquiridas en fechas diferentes o por diferentes sensores (CEDREM, 2017), obteniendo valores de píxel de rango normalizado entre los valores -1 y 1.

La corrección atmosférica busca reducir el efecto de la interacción de las moléculas y partículas de la atmósfera (vapor de agua, polvo en suspensión, aerosoles, entre otras) en la radiación electromagnética captada por los sensores de un satélite. La eliminación de los efectos atmosféricos, recuperan los parámetros físicos de la superficie incluyendo la reflectancia y visibilidad del suelo (CEDREM, 2017).

Para este fin se utilizó el modelo de corrección de reflectancia a nivel de superficie DOS 1 o sustracción de objeto oscuro, el que se basa en la suposición básica que en la imagen algunos píxeles están completamente en sombra, y sus radiancias recibidas en el satélite se deben a la dispersión atmosférica (efecto bruma) (Publicación Image-Based Atmospheric Corrections por Chavez, 1996). Esta suposición es combinada con el hecho de que muy pocos elementos en la superficie de la Tierra tienen un color negro absoluto, por lo tanto, una reflectancia asumida de uno por ciento es mejor que un cero por ciento (Manual del Plugin SCP de QGIS 3.1 por Congedo, 2020).

Ambas correcciones se realizaron a través del software QGIS 3.1, utilizando el Plugin SCP o Semiautomatic Classification Plugin. Para esto se cargan las bandas B2 y B4 (Landsat 4-7) y B3 y B4 (Landsat 8) en el directorio de preprocesamiento de imágenes del Plugin SCP, se selecciona “aplicar la corrección atmosférica DOS1” para aplicar una corrección de la reflectancia a nivel de superficie y se carga el archivo Metadato MTL respectivo a la imagen, el que entrega detalles de los valores de reflectancia, radiancia mínima y máxima, constante de conversión termal, Qcal máximo y mínimo, que es el valor máximo y mínimo del pixel cuantificado y calibrado (Congedo, 2020).

Una vez corregidas las bandas, se guardaron en el Anexo III, carpeta Imágenes satelitales según año y estación.

### **5.2.3.2. Procesamiento**

Posteriormente, con las bandas corregidas se obtuvo el índice NDWI (Normalized Difference Water Index), a través de la función de QGIS 3.1 “Calculadora Raster”, la que permite realizar cálculos con las bandas.

El índice NDWI varía entre -1 y 1, asocia los valores positivos para las superficies con agua o húmedas y cero o negativo para el suelo y la vegetación terrestre estresada (Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico 2016 de Albemarle elaborado por CEDREM, 2017).

Para imágenes del sensor Landsat 4 a 8, el cálculo de este índice se realizó aplicando la siguiente fórmula:

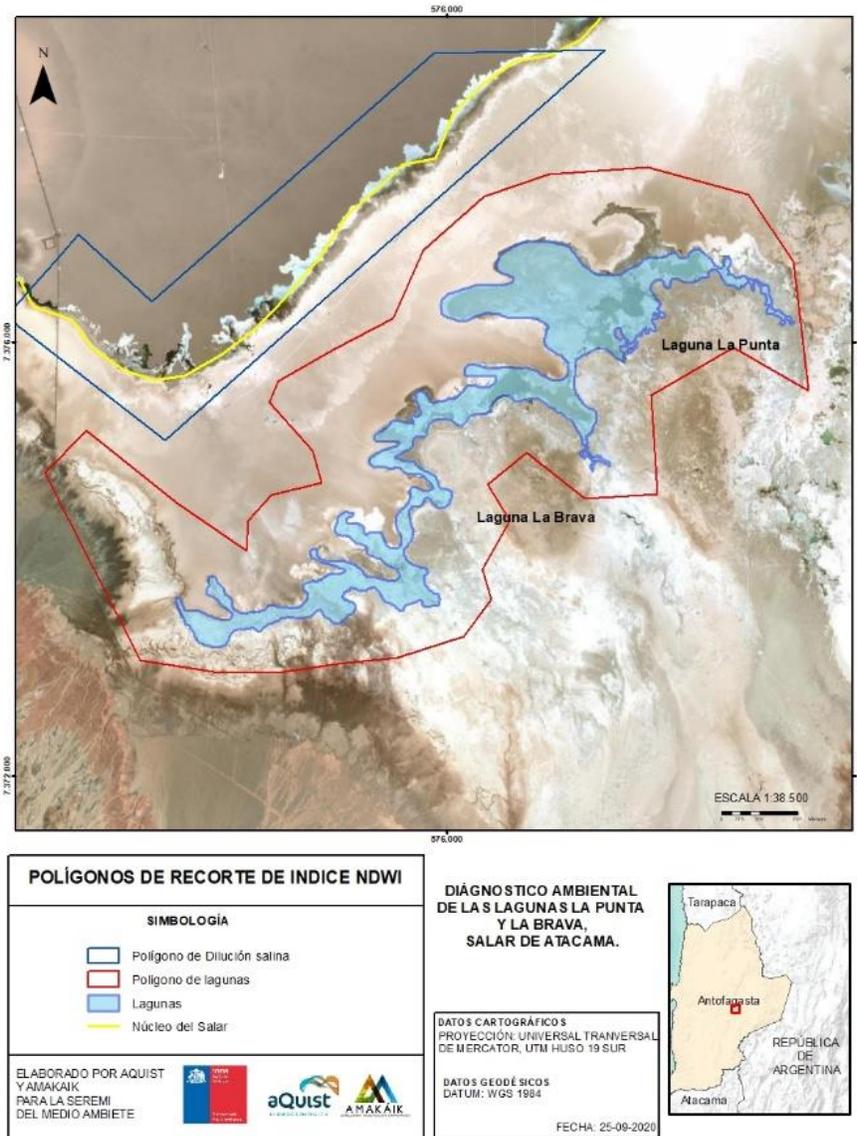
$$\text{NDWI} = (V - \text{NIR}) / (V + \text{NIR})$$

Dónde: V es la reflectancia en el verde y NIR es la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

El cálculo de bandas del sensor Landsat 4 a 7, utilizando la calculadora raster es el siguiente:  $(B2 - B4) / (B2 + B4)$ .

El cálculo de bandas del sensor Landsat 8, utilizando la calculadora raster es el siguiente:  $(B5 - B4) / (B5 + B4)$ .

Figura 5-2 Polígonos de recorte de índice NDWI



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, los índices NDWI se recortaron a través de un polígono en formato shapefile que bordea los límites de las lagunas (.

Figura 5-2 Polígonos de recorte de índice NDWI

), creado en el software ArcGis 10.4 a partir del proceso “new shapefile” y “start editing”. Este polígono fue creado utilizando como base la banda 3 de la imagen de fecha 10 de enero de 1997. Todas las imágenes se recortaron usando este shapefile, ya que sus límites se ajustan a los bordes de las lagunas que se visualizan en todas las imágenes de este estudio, a excepción de las imágenes correspondientes a las siguientes fechas 8/01/1996, 21/05/1998, 15/10/1999, 28/10/1999, 19/01/2003 y 07/04//2014. Para recortarlas se creó un shapefile específico.

Tabla 5-7 Polígono de recorte Zona de Dilución Salina

Tiempo	Vértices	Coordenadas UTM (Datum WGS84)	
		Este (m)	Norte (m)
1985-2019	1	575878,1	7378663,8
	2	577459,3	7378694,3
	3	573396,0	7375087,0
	4	571932,3	7376239,5
	5	572597,3	7376990,7
	6	573272,6	7376375,0

Fuente: Elaboración propia

También se realizó un recorte al área correspondiente a la zona de dilución salina, ubicada al norte de las lagunas y en la parte sur del borde marginal del Salar (Figura 4-1). El polígono utilizado se construyó a partir de los vértices especificados en la Tabla 5-7, el que es usado en todos los índices NDWI, a excepción de las siguientes fechas 19/01/2003 y 14/05/2016, para los cuales se utilizó uno específico, dado diferencias de georreferencia. Los archivos NDWI creados se guardaron por año y temporada en la carpeta “Biblioteca de Índice NDWI” en el Anexo III.

### 5.2.3.3. Postprocesamiento

Los archivos de recorte NDWI tanto de las lagunas y de la zona de dilución, se sometieron a clasificación no supervisada de tipo Isodata y K-means para obtener el área de la cobertura de agua.

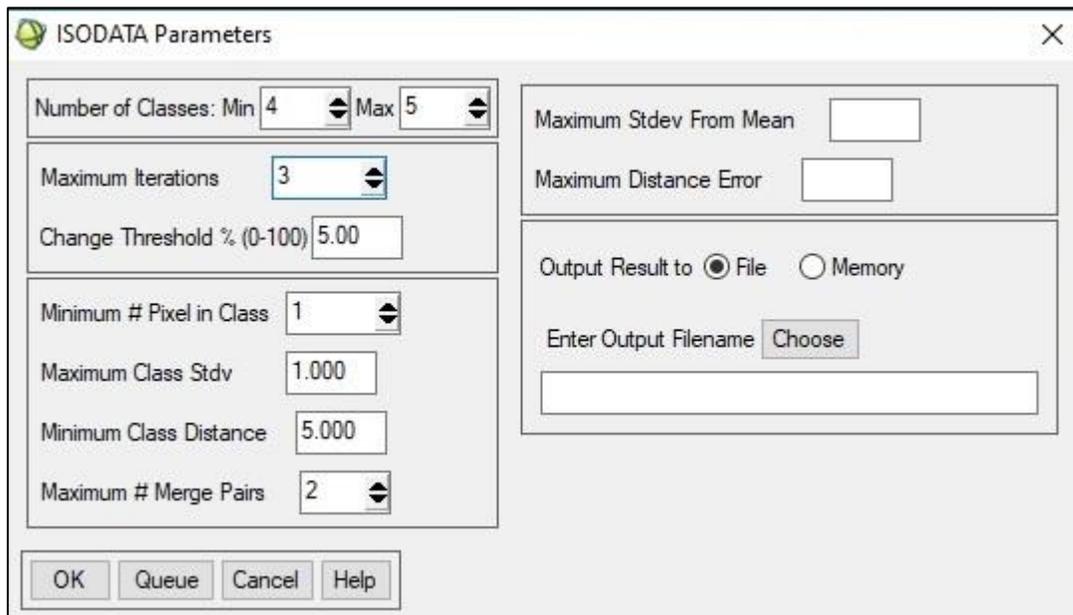
La clasificación no supervisada es un proceso de agrupación de píxeles con valores digitales similares para todas las bandas, cada una de estas agrupaciones son llamadas clases espectrales, las cuales se supone

corresponden a un tipo de cubierta de terreno. Los métodos usados para desarrollar esta clasificación son del tipo agrupamiento o “clustering” (Publicación: Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: “Landsat-ETM por Arango, et al., 2005)

El agrupamiento o “Clustering” es una técnica de clasificación en que la imagen es segmentada en clases desconocidas que posteriormente serán etiquetadas. Ésta se emplea en los métodos K-medias, C-medias e Isodata (Interactive Self-Organizing Data Analysis Technique (Algorithm)), los que calculan los promedios de las clases o agrupaciones que eventualmente están distribuidos en el espacio de decisión.

Para el método Isodata, en cada una de las iteraciones se recalcularon los promedios y se reclasificaron los píxeles de la imagen con respecto a los nuevos promedios, el proceso continuó hasta que el cambio del número de píxeles en cada clase (cluster) fue mínimo respecto a un valor de tolerancia o hasta que se realizó cierto número de iteraciones predefinidas (Arango, et al., 2005).

Figura 5-3 Parámetros técnicos de clasificación no supervisada Isodata



Fuente: Elaboración propia a partir de ENVI 5.3.

En este diagnóstico, se realizaron pruebas de clasificación no supervisada tipo K-Means e Isodata en el software ENVI 5.3, obteniendo mejores resultados con el método Isodata, a través de los parámetros señalados en la Figura 5-3, por lo que se decidió aplicarlos en todos los NDWI. Además, como método de corroboración de clasificación de cobertura de agua, se comparó el resultado con una imagen Falso color, obtenida mediante la combinación de bandas RGB 432.

Tabla 5-8 Interpretación de clases obtenidas mediante clasificación Isodata NDWI lagunas

Clases	Cobertura
1	Suelo
2	Otro
3	Agua superficial
4	Agua profunda

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior permitió obtener un archivo raster en formato hdf, que clasifica los pixeles de las lagunas en rangos o clases del 1 al 4. El rango 1 corresponde a los valores más bajos del índice NDWI y el 4 al más alto. Se interpreta, a modo general, que estas 4 clases corresponden a las coberturas de agua profunda, agua superficial, suelo y otro (Tabla 5-8).

Luego se contabilizaron los pixeles que forman parte de las clases agua superficial y profunda. Para esto se utilizó la función de ENVI 5.3 “Quick Stat”. Finalmente, cada píxel posee un área de 900 metros cuadrados, para los índices obtenidos con las imágenes landsat 4 a 8, por lo que se multiplicará el número de pixeles por 900 para obtener la superficie.

Tabla 5-9 Interpretación referencial de las clases obtenidas mediante clasificación isodata para zona de dilución salina

Clases	Cobertura
1	Salar
2	Suelo salino
3	Salmuera
4	Agua superficial
5	Agua

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de la clasificación isodata para la zona de dilución salina son los mismos, pero considerando un mínimo de 3 y un máximo de 5 clases, ya que el recorte del índice NDWI para esta zona presenta parte del núcleo sur del Salar y en algunas temporadas no presenta cobertura húmeda (Tabla 5-9).

En la tabla de base de datos se decidió sumar el número de clases de valor 3 a 5 de la zona de dilución, y agruparlos en solo una categoría llamada agua. Los archivos obtenidos mediante clasificación isodata para las lagunas y la zona de dilución, se guardaron por año y temporada en la carpeta “Biblioteca de Índice NDWI Reclasificado” en Anexo III. En esta carpeta se presenta para cada temporada anual un archivo raster en formato HDF y otro archivo de extensión HDR que no contiene información raster, pero permite cargar el archivo anterior en el software ENVI.

#### 5.2.3.4. Validación

Se realizó una validación de las coberturas de agua a través de una imagen “Falso color” obtenida a través de la combinación de bandas RGB 432, utilizando el software ENVI 5.3, la que permite recrear las distintas coberturas de suelo con colores similares a los naturales.

Se superpuso el archivo raster obtenido en la clasificación no supervisada sobre la combinación Falso color, de esta forma se comprobó visualmente si los píxeles clasificados como agua superficial y profunda coincidieron.

Tabla 5-10 Fechas de imágenes usadas en validación.

Fecha Imagen Sentinel	Fecha Imagen Landsat 7- 8
12/08/2019	11/08/2019
19/05/2018	20/05/2018

Fuente: Elaboración propia

Además, se calculó el porcentaje de acierto de las coberturas de agua profunda y superficial detectadas. Para esto, primero se aplicó la misma metodología de detección de píxeles de agua, en una imagen de mejor resolución de 100 m, de tipo Sentinel corregida, obtenida a través del portal <https://glovis.usgs.gov/app> que coincidió con la misma fecha de la imagen Landsat o máximo 1 día de desfase (Tabla 5-10).

Posteriormente, se obtiene el número de aciertos, que corresponde al número de píxeles clasificado como agua en las imágenes de ambos satélites, lo que se realiza multiplicando los píxeles clasificados como agua de la imagen Sentinel con los de la imagen Landsat, a través de la multiplicación en la calculadora raster de QGIS 3.1. Esto se divide por el total de píxeles de agua obtenidos en la imagen Sentinel, los que previamente se dividen por 9, ya que su resolución es mayor.

#### Porcentaje de acierto=

$$((N^{\circ} \text{ de píxeles de agua en ambas imágenes}) / (N^{\circ} \text{ píxeles de agua imagen Sentinel}/9)) * 100$$

El porcentaje de acierto de detección de píxeles clasificados como agua superficial y profunda es de 60% para las imágenes Landsat, al compararlo con las imágenes Sentinel en las fechas señaladas (Tabla 5-10).

Además, se realizó una estimación de altura de la columna de agua de los píxeles clasificados como agua superficial y profunda. Para esto, se utilizaron los datos de monitoreo de nivel lagunar de Minera la Escondida y de los limnímetros de Albemarle próximos a las lagunas La Punta y La Brava. Entonces se estima probable, que píxeles clasificados como agua profunda son detectados a una profundidad próxima a los 30 cm y los de agua superficial desde los 20 cm aproximadamente.

Se debe mencionar que para validar el modelo de detección de agua se necesita realizar una calibración en terreno, tomando puntos de muestreo que efectivamente correspondan a agua superficial y profunda en las lagunas, como también comparar con imágenes de mejor resolución espacial.

Por otro lado, se incorporó a la base de datos abiótica y al análisis, los datos de superficie lagunar del Anexo G del Plan de Alerta Temprana de Minera Escondida 2018, temporalidad verano e invierno, 2002 a 2018 (Ver carpeta MEL, pozos y meteorología del Anexo II).

También, se añadió un registro histórico de la superficie cubierta por las lagunas desde 1985 a 2019, obtenido a partir del Anexo C, informe N°3 del Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico 2019 de Albemarle, RCA 21/2016 y 4 registros del anexo 11, de la Adenda N°2 año 2010. Se cuenta con 1 registro de superficie lagunar desde 1985 a 2012, existiendo años sin información. Desde 2013 a 2019 se cuenta con 14 a 4 registros por año, a excepción del 2015 que no registra información. Sin embargo, debido a la falta de datos periódicos y constantes, no se realizó análisis ni se presentaron resultados

### **5.3 Correlaciones temporales y espaciales de los factores ambientales.**

Como fue indicado en metodología, luego de verificar si las variables analizadas cumplían con los requisitos para análisis paramétricos, se encontró que la mayoría de las variables no presentan una distribución normal, ni homocedasticidad. Por esta razón se optó por usar el coeficiente de correlación de Spearman para ejecutar la correlación de variables. Esto se realizó con los promedios estacionales de todas las variables, como fue explicado en 5.2.2.4. Se elaboraron matrices de correlación de las distintas variables, que son presentadas según la naturaleza de la variable (hidrogeología, físicoquímica o biológica), donde primero se analiza cada grupo de variable por separado. Luego, se discuten las correlaciones entre distintos grupos en las siguientes secciones. Como este estudio integra bases de datos que cubren períodos temporales distintos, cada análisis de correlación presentado es elaborado para el período en que se dispone de observaciones continuas para todas las variables utilizadas. Estos períodos son: de 2013 hasta 2018 para niveles freáticos y lagunares, temperatura y precipitación; de 1996 hasta 2018 para superficie lagunar/dilución salina y niveles lagunares, de 2013 hasta 2018 para evapotranspiración, precipitación, niveles freáticos y superficies; de 2000 hasta 2018 para parámetros químicos medidos *in situ* y macroelementos medidos en laboratorio; de 2010 hasta 2016 para iones y metales; y finalmente, de 2014 hasta 2019 para variables biológicas.

El coeficiente de correlación de Spearman varía de  $-1$  a  $+1$ . Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más estrecha es la relación entre las variables. Un valor absoluto de 1 indica una correspondencia monótonica de 100% entre el conjunto de datos de las variables, en cambio una correlación cercana a 0 indica que las variables no son funciones monótonicas de la otra, y por lo tanto no covarían las variables.

El signo del coeficiente indica la dirección de la relación. Si ambas variables aumentan o disminuyen de manera sincrónica, el coeficiente es positivo y la relación monotónica que representa la correlación forma una pendiente positiva. Si una variable incrementa mientras la otra disminuye, el coeficiente es negativo y la relación monotónica que representa la correlación forma una pendiente negativa.

La correlación se considera significativa si el p-valor, según una distribución-t de Student con  $\alpha=0,05$ , es menor a 0,05. Las tablas de las matrices de correlación exponen solamente las correlaciones significativas, o en su defecto, se representan las correlaciones no significativas con celdas vacías.

Para la interpretación de las correlaciones obtenidas se consideró la siguiente tabla:

Tabla 5-11 Interpretación del coeficiente de correlación de Spearman

Correlación	Clasificación
-0,90 a -0,99	Negativa muy alta
-0,70 a -0,89	Negativa alta
-0,40 a -0,69	Negativa moderada
-0,20 a -0,39	Negativa baja
-0,01 a -0,19	Negativa muy baja
0	Nula
0,01 a 0,19	Positiva muy baja
0,20 a 0,39	Positiva baja
0,40 a 0,69	Positiva moderada
0,70 a 0,89	Positiva alta
0,90 a 0,99	Positiva muy alta

Fuente: (Szmidt & Kacprzyk, 2011)

#### 5.4 Definición de condiciones de referencia y estado de salud de las lagunas La Punta y La Brava.

Como condición de referencia para los puntos de monitoreo de las variables abióticas nivel freático, nivel lagunar, conductividad eléctrica superficial y superficie lagunar, se tomó el penúltimo valor más bajo de la data histórica disponible por estación (verano e invierno), omitiendo valores anómalos que se alejen de la tendencia de los datos (Pramar ambiental, s, f).

Lo anterior se realizó con el objeto de mantener el sistema dentro de su variación histórica natural, tomando como criterio base lo establecido en la sección XII "Observaciones al Anexo III: Plan de contingencia modificado", de la Adenda II- EIA Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama de SQM, el cual permite establecer una condición de referencia considerando la variación natural de los sistemas lagunares.

Considerando que el objeto de definir valores de referencia es evaluar el estado de salud de las lagunas, utilizar el penúltimo valor de la serie temporal de datos disponible, garantiza un umbral conservador respecto al diagnóstico de los cuerpos superficiales de agua.

Mientras que, para los barrenos pertenecientes al Plan de alerta temprana (PAT) de Albemarle se presenta como valor de referencia el umbral ya establecido en el PAT.

Se omitieron los valores de referencia de los limnímetros L12-2 y L12-3, dado que a pesar de que los lisímetros monitorean desde 1998 solo se dispuso de información reciente, correspondiente al período 2015 a 2019.

Ya que los variables fisicoquímicas y biológicas pueden causar alerta si los valores son anómalamente altos o bajos, a diferencia de las variables hidrogeológicas donde la causa de alerta son principalmente los valores bajos, se optó por un criterio distinto para las condiciones de referencia. Para definir los umbrales o condiciones de referencia de los factores ambientales (físicoquímicos y biológicos) asociados a las lagunas superficiales, se realizó un análisis con estadística descriptiva, considerando para cada variable el valor mínimo, valor máximo, promedio, desviación estándar, mediana y moda. Estos parámetros fueron considerados por laguna y por período de muestreo. Se determinaron los percentiles, sin promediar, para cada parámetro y finalmente fueron considerados los valores que delimitan la distribución del 90% de los datos, 5% como límite inferior y 95% como límite superior.

Finalmente, luego de aplicar los criterios estadísticos se realizó el análisis a juicio de experto, incorporando el conocimiento y experiencia de los especialistas hidrogeólogos, químicos y biólogos, para proponer **condiciones de referencia operacionales.**

## **5.5 Indicadores y variables a medir en el monitoreo de las lagunas La Punta y La Brava**

Para comprender el comportamiento de un sistema hidrogeológico se deben identificar y caracterizar los principales aspectos físicos que rigen el funcionamiento del mismo.

En este escenario, el rol de este equipo consultor consiste en definir objetivamente, en base a criterios cualitativos y cuantitativos, los indicadores de estado asociados a los potenciales impactos sobre las lagunas, los criterios de decisión para implementar acciones y las características de diseño de acciones que permitan cumplir los objetivos propuestos.

Con el objeto de determinar los principales aspectos que deben ser estudiados y monitoreados en un sistema hidrogeológico, se toma como base la Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA (SEA, 2012). Dentro de éste se tiene que, como mínimo, se deben caracterizar aspectos como: geología, hidrogeología, hidrología, piezometría e hidroquímica al momento determinar el comportamiento de un sistema hidrogeológico.

Los indicadores definidos corresponden a parámetros específicos asociados a puntos de control ubicados de tal forma de anticipar potenciales impactos. En cuanto a la ubicación de los puntos de control, estos deben cumplir con tres condiciones: i) ser un subconjunto de puntos de observación asociados a un plan de seguimiento de variables ambientales, ii) ubicarse fuera del receptor y, iii) estar en la ruta que seguiría un potencial impacto entre la fuente y el receptor. A través de simulaciones numéricas es posible seleccionar los puntos de monitoreo más adecuados que cumplan con las condiciones antes mencionadas, sin embargo, esto último está fuera de los alcances de este estudio.

Dentro del monitoreo ambiental de los sistemas La Punta y La Brava, los principales aspectos a determinar y monitorear corresponden a hidrología e hidrogeología debido a que estos poseen una variabilidad espacial y, principalmente, temporal.

En el desarrollo del componente hidrológica que permita precisar la recarga por precipitación que posee el sistema, se requiere información de precipitación, temperatura, evaporación y escurrimientos superficiales (SEA, 2012).

La caracterización hidrogeológica permite determinar aspectos como: piezometría, direcciones de flujo subterráneo, zonas de recarga y descarga, entre otros. Para esto se requiere la recopilación de información de campo tales como: catastro de pozos, medición y monitoreo de niveles piezométricos (SEA, 2012).

Es así como, considerando los principales componentes que deben ser definidos para la comprensión del funcionamiento de un sistema hidrogeológico y la información de campo que se requiere para ello, y sobre la base de lo propuesto en la Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA (SEA, 2012), es que se propone la incorporación de variables de monitoreo y la ampliación del sistema de monitoreo actual, lo cual queda detallado en el capítulo 7.

En el caso de las lagunas superficiales, la propuesta de monitoreo se basa en los resultados del análisis de las variables y sus respectivos parámetros y el juicio de experto.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Listado de factores ambientales que controlan o modelan las lagunas La Punta y La Brava.

En la

Tabla 6-1, se presentan las variables de estado, forzantes y controladoras para cada componente considerado según el área de influencia de este proyecto, recursos hídricos, ecosistemas acuáticos, antrópico y abiótico.

Tabla 6-1 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes del componente C1 de hidrología

Componente	Variables de estado	Variables forzantes	Variables controladoras
<b>C1 Recurso hídrico</b>			
<b>SC11 Hidrología</b>	Precipitación Evaporación	Factor climático	Energía solar Efecto invernadero Circulación atmosférica Circulación oceánica
<b>SC21 Hidrogeología</b>	Nivel piezométrico Permeabilidad Transmisividad Almacenamiento específico	Precipitación Evaporación	Factor climático
<b>SC31 Calidad de agua superficial</b>		Precipitación Evaporación Nivel piezométrico Pendiente Tipo de sustrato Altitud geográfica Temperatura del agua Caudal (Hidrología) Velocidad de la corriente (Hidrología) Profundidad del curso o laguna (Hidrología) Área de espejo de agua (Hidrología) Concentración de Nutrientes (compuestos nitrogenados y fosforados) Concentración de Macroelementos (Ca, Mg, K, Na, etc) Concentración de Metales (Se, Li, etc) Concentración de Oxígeno disuelto Conductividad/Salinidad	<b>Clima:</b> <i>Invierno Altiplánico</i> <i>Oscilación modal (ENSO)</i>
<b>SC41 Calidad de agua subterránea</b>	pH Eh Conductividad Calcio Magnesio Sodio Potasio Carbonato Bicarbonato Cloruro Sulfato Nitrato Temperatura Elementos minoritarios Elementos traza	Precipitación Evaporación Nivel piezométrico Permeabilidad Transmisividad Almacenamiento específico Temperatura Geoquímica	Precipitación Evaporación
<b>SC51 Hidráulica</b>			

Fuente: CMNM-AMAKAIK, 2018

Tabla 6-2 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes del componente C4 de ecosistemas acuáticos. El doble asterisco (\*\*) indica que las variables son comunes para todos los subcomponentes

Componente	Variables de estado**	Variables forzantes**	Variables controladoras**
<b>C4 Ecosistemas acuáticos</b>			
SC14 Zooplancton	Presencia	<b>Calidad del agua:</b>	<b>Clima :</b>
SC24 Ictiofauna	Abundancia	Concentración de Nutrientes	Invierno Altiplánico
SC34 Zoobentos	Densidad	(compuestos nitrogenados y compuestos fosforados)	Oscilación modal como ENSO
SC44 Fitoplancton	Biomasa	Concentración de Macroelementos (Ca, Mg, K, Na)	
SC54 Fitobentos	Riqueza de especies	Concentración de Metales (Se, Li, etc)	
SC64 Hidrofitos acuáticas	Diversidad	Concentración de Oxígeno disuelto	
SC74 Tapetes microbianos	Consumo de energía	Temperatura del agua	
		Conductividad/Salinidad	
		<b>Hidrología:</b>	
		Caudal	
		Velocidad de la corriente	
		Profundidad del curso o laguna	
		<b>Recursos hídricos:</b>	
		Evaporación	
		Precipitación	
		Nivel piezométrico	
		<b>Pendiente</b>	
		<b>Tipo de sustrato</b>	
		<b>Altitud geográfica</b>	
		<b>Relaciones tróficas (predación y pastoreo)</b>	
		<b>Interacciones:</b>	
		Competencia	
		Comensalismo	
		Mutualismo	
		Parasitismo	

Fuente: CMNM-AMAKAIK, 2018

Tabla 6-3 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes del componente C5 antrópico

Componente	Variables de estado	Variables forzantes	Variables controladoras
<b>C5 Antrópico</b>			
SC15 Asentamiento humano	Actividad agro-pastoril	Distancia a salar	
	Actividad de extracción	Ganado domestico	
		Mascotas	
		Densidad	
SC25 Asentamiento Industrial	Actividad de extracción		
SC35 Infraestructura			

Fuente: CMNM-AMAKAIK, 2018

Tabla 6-4 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes del componente C5 abiótico

Componente	Variables de estado	Variables forzantes	Variables controladoras
<b>C6 Abiótico</b>			
SC16 Geoquímica	Mineralogía	Mineralogía	Presión de formación
		Factor climático	Temperatura de formación
			Precipitación
SC26 Topografía			

Fuente: CMNM-AMAKAIK, 2018

La selección de las variables se realizó entre las que fueron predeterminadas para el Salar de Atacama a nivel de cuenca, considerando el área de influencia específica de este proyecto, a juicio de experto y que cumplan con los requisitos planteados: a) que constituyan componentes relevantes del ecosistema, ya sea por su rol

forzante de procesos o estructurador de hábitat; b) que sea medido o monitoreado; c) que tenga alguna conexión con las fuentes de presión.

Las variables seleccionadas se muestran en Tabla 6-5 y Tabla 6-6.

Tabla 6-5 Criterios variables forzantes.

Factor ambiental	Componente relevante del ecosistema por su rol forzante de procesos o estructurador de hábitat	Medido o monitoreado	Conexión con las fuentes de presión
Precipitación	Sí	Sí	No
Temperatura atmosférica	Sí	Sí	No
Nivel piezométrico	Sí	Sí	Sí
Temperatura de aguas superficiales	Sí	Sí	Sí
Área de espejo de las lagunas	Sí	Sí	Sí
Concentración de nutrientes en aguas superficiales	Sí	Sí	Sí
Concentración de macroelementos en aguas superficiales	Sí	Sí	Sí
Concentración de metales en aguas superficiales	Sí	Sí	Sí
Oxígeno disuelto en aguas superficiales	Sí	Sí	Sí
Conductividad/Salinidad en aguas superficiales	Sí	Sí	Sí
pH en aguas superficiales	Sí	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Precipitación y temperatura atmosférica son factores ambientales independientes de las fuentes de presión porque no se ven afectadas por ellas. En cambio, el resto de los factores ambientales propuestos pueden verse afectados por la extracción de salmuera o de agua subterránea. Específicamente la actividad minera no metálica, puede provocar un descenso de los niveles de agua subterránea y superficial, descenso que produce una concentración de metales, cambio en el balance iónico del agua y, por lo tanto, cambios en el pH, la conductividad, etc. A su vez una disminución del espejo de las lagunas produce un aumento de la temperatura del agua al tener menos masa de agua expuesta a la radiación solar, lo que afecta la solubilidad de del oxígeno y otros elementos que generan cambios en el sistema.

Por otra parte, se consideran dentro de este análisis los subcomponentes biológicos a modo de variables respuesta, que modifican su estructura y dinámicas comunitarias en función de los cambios en los factores ambientales y que son además estructuradores de hábitat, ya que modifican su propio ambiente como producto de su actividad biológica.

Tabla 6-6 Criterios variables respuesta.

Factor ambiental	Componente relevante del ecosistema por su rol forzante de procesos o estructurador de hábitat	Medido o monitoreado	Conexión con las fuentes de presión
Microorganismos extremófilos	Sí	Sí	Sí
Fitobentos	Sí	Sí	Sí
Fitoplancton	Sí	Sí	Sí
Zoobentos	Sí	Sí	Sí
Zooplancton	Sí	Sí	Sí
Plantas Vasculares Acuáticas.	Sí	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia.

Si bien, los estructuradores de hábitat por excelencia son los microorganismos extremófilos, la presencia o ausencia de los otros grupos biológicos, que cumplen una importante función ecosistémica, pueden modificar concentraciones de elementos en el ambiente (nutrientes, oxígeno, etc.) y las interacciones entre los distintos grupos pueden modular la dinámica ecosistémica de las lagunas.

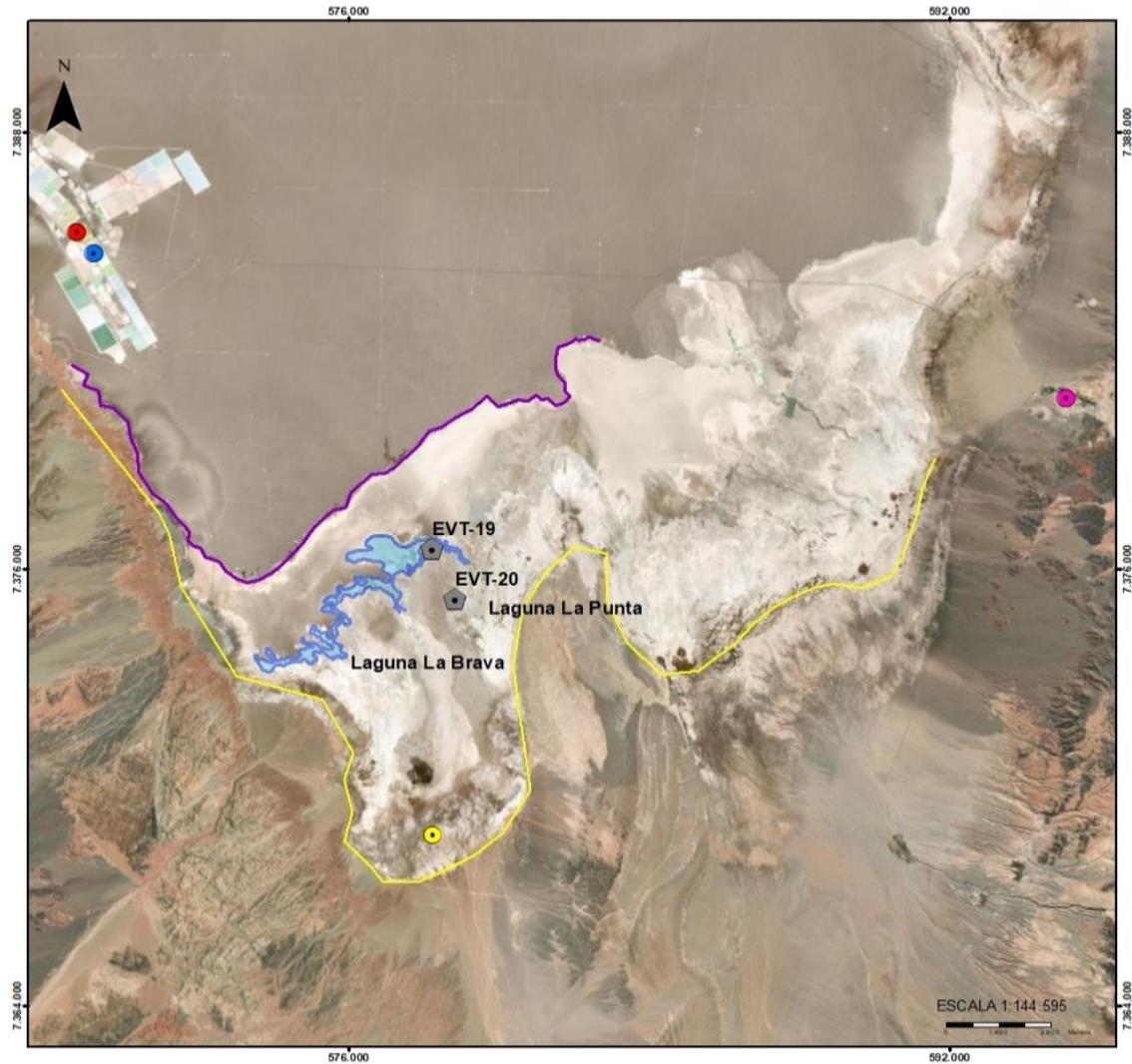
Estas variables, en adelante consideradas como variables respuesta, fueron analizadas en función de los parámetros de densidad, riqueza y diversidad, para cada grupo biológico.

En el caso de los microorganismos extremófilos, la información no es obtenida de manera cuantitativa ni sistemática, de modo que este grupo se evaluó solo respecto de su composición taxonómica.

## 6.2. Comportamiento temporal y espacial de los factores ambientales.

Para una mejor visualización del análisis espacial se procedió a generar mapas cartográficos de todos los puntos de muestreo que registran datos relevantes en este estudio. En la Figura 6-1 y Figura 6-2 se visualizan los pozos, los limnímetros y los puntos de monitoreo de niveles lagunares seleccionados para los análisis,

presentados según la división de componente espacial. En la



ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y MONITOREO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	
<b>SIMBOLOGÍA</b>	
<b>Estaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li> Monitoreo Evapotranspiración</li> <li> Lagunas</li> <li> Núcleo del Salar</li> <li> Zona marginal</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li> EM-Rockwood</li> <li> EM-SCL</li> <li> EM-Tilopozo</li> <li> EM-Peine</li> </ul>	
ELABORADO POR AQUIST Y AMAKAIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> </div>	

**DIAGNOSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.**

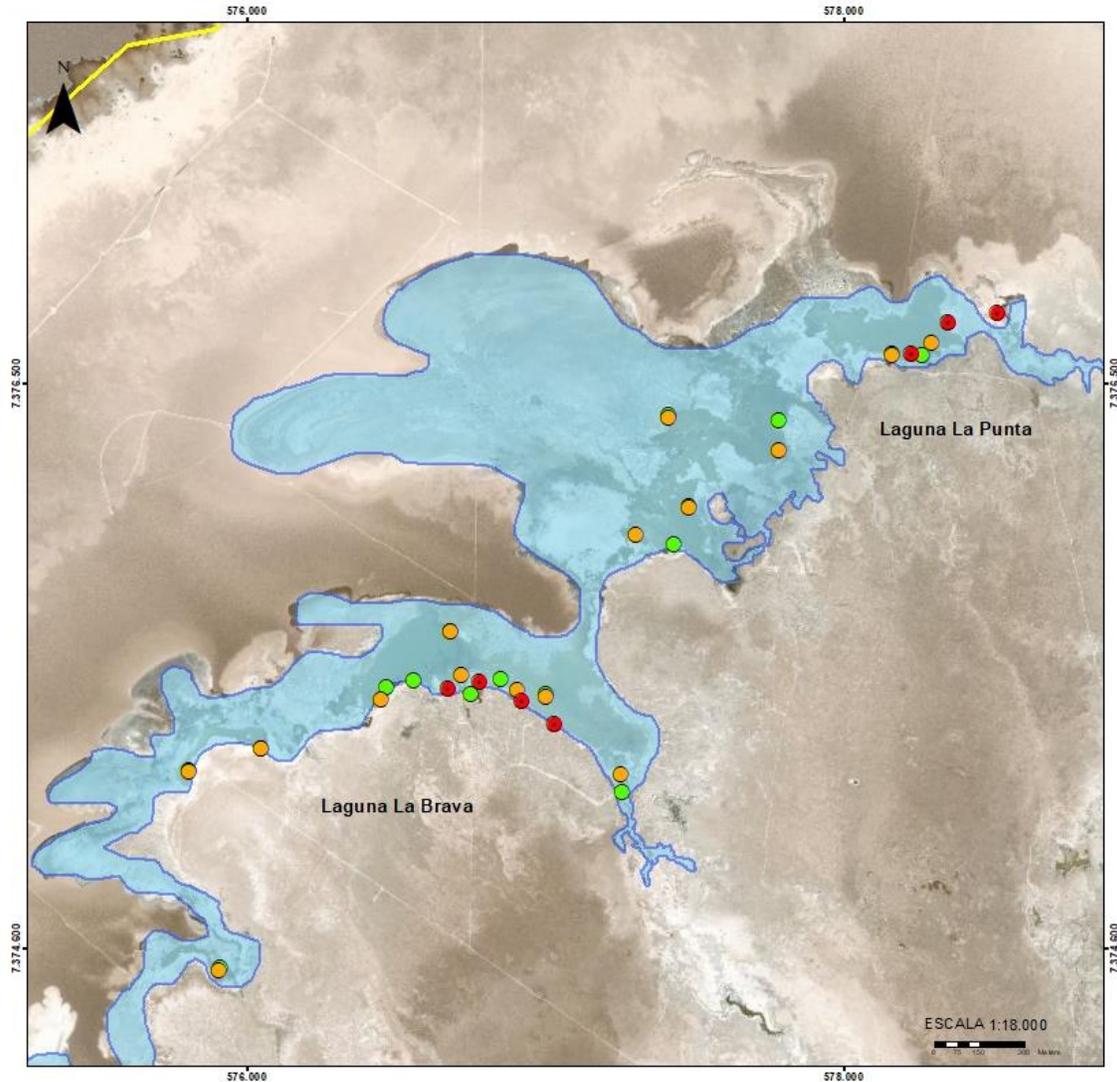
**DATOS CARTOGRAFICOS**  
 PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR

**DATOS GEODÉSICOS**  
 DATUM: WGS 1984

FECHA: 23-09-2020



Figura 6-3 se visualizan las estaciones meteorológicas y los puntos de monitoreo de evapotranspiración más cercanos al área de influencia directa. Por su parte, en la



<b>COMPONENTES BIÓTICOS (CALIDAD DEL AGUA)</b>	
SIMBOLOGÍA	
<span style="color: red;">●</span>	Puntos de muestreo Albermarle
<span style="color: orange;">●</span>	Puntos de muestreo MEL
<span style="color: green;">●</span>	Puntos de muestreo CMZ
<span style="border: 1px solid blue; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span>	La Punta y La Brava
ELABORADO POR AQUIST Y AMAKÁIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE	

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.**

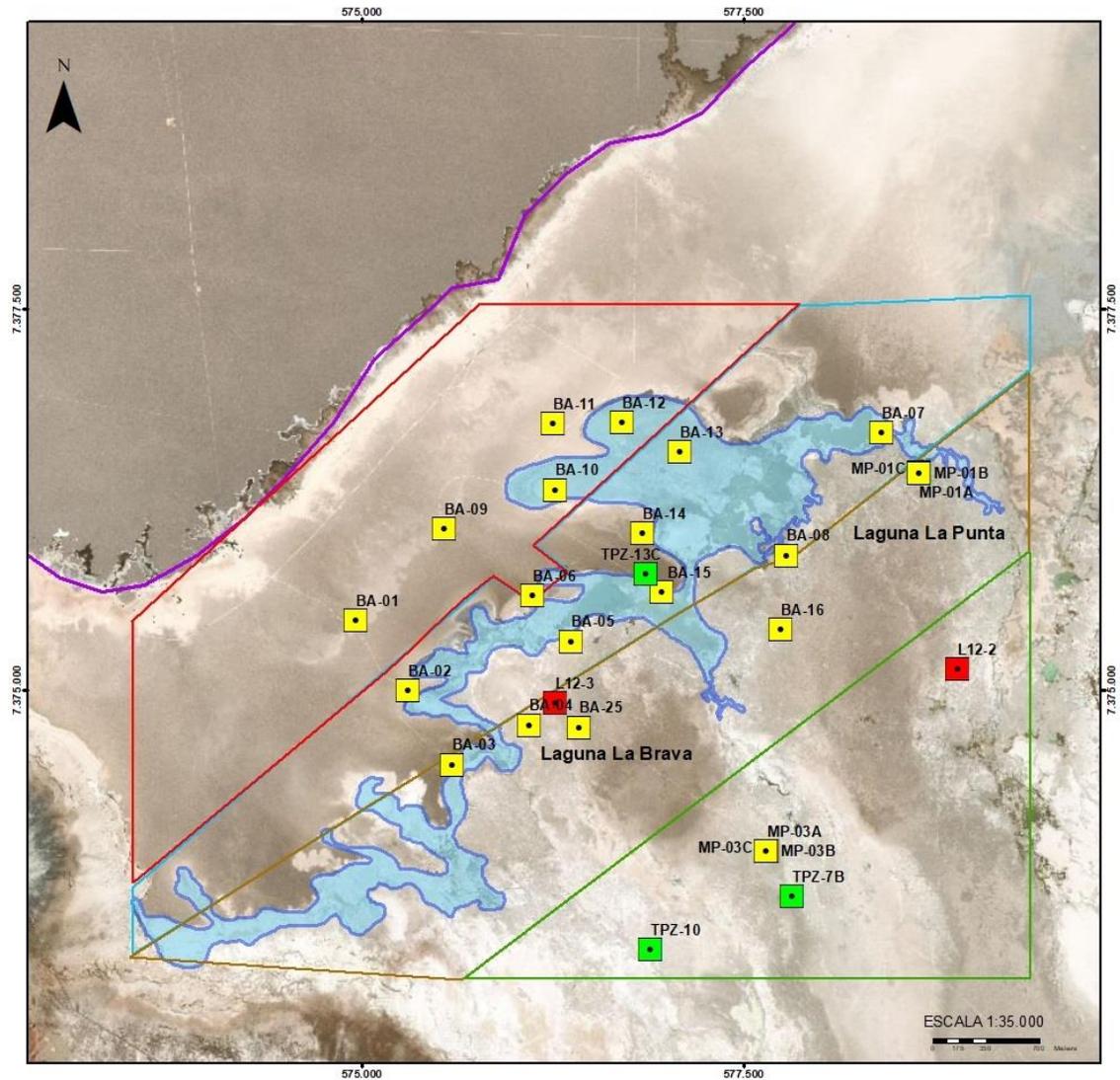
DATOS CARTOGRÁFICOS  
PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR

DATOS GEODÉSICOS  
DATUM: WGS 1984

FECHA: 29-05-2020



Figura 6-4 se observan los puntos de muestreo de datos acuáticos que registran datos relevantes dentro del área de influencia directa. Se indican las coordenadas UTM tanto de pozos, limnímetros, puntos de monitoreo nivel lagunar, evapotranspiración y estaciones meteorológicas, como de puntos de monitoreo de calidad del agua (Tabla 6-7, Tabla 6-8, Tabla 6-9 y Tabla 6-10)



**LOCALIZACIÓN DE PIEZÓMETROS SEGÚN COMPONENTE ESPACIAL**

**SIMBOLOGÍA**

- Componente Espacial Norte
- Componente Espacial Borde de las lagunas
- Componente Espacial Sur
- Componente Espacial Sur lejano
- Lagunas
- Núcleo del Salar

ELABORADO POR AQIUST Y AMAKAIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.**

**DATOS CARTOGRÁFICOS**  
PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR

**DATOS GEODÉSICOS**  
DATUM: WGS 1984

FECHA: 01-06-2020



Figura 6-1 Localización de piezómetros según componente espacial

Fuente: Elaboración propia

Se dividió el área indirecta en 4 componentes espaciales, tomándose como referencia principal las mismas lagunas La Punta y La Brava.

El componente espacial norte se refiere a un espacio delimitado localizado hacia el norte de las lagunas. Este componente se nombrará también como “aguas abajo”, dado que la altitud es menor que en el componente espacial sur lejano o aguas arriba. A modo de referencia, la cota collar de los piezómetros localizados en este sector están en un rango entre 2.300,787 a 2.300,999 msnm de altitud.

El componente espacial borde lagunar, se refiere al sector delimitado más próximo a las lagunas o en las lagunas mismas.

El componente espacial sur, se refiere a un espacio delimitado localizado hacia el sur de las lagunas. Lo mismo sucede para el componente sur lejano, sin embargo, éste se localiza a mayor distancia de las lagunas. A estos últimos dos componentes espaciales, se les nombrará también como “aguas arriba”, dado que se localizan a una altitud mayor que aguas abajo. La cota collar de los piezómetros localizados en este sector están en un rango entre 2.301,19 a 2.303,84 msnm de altitud.

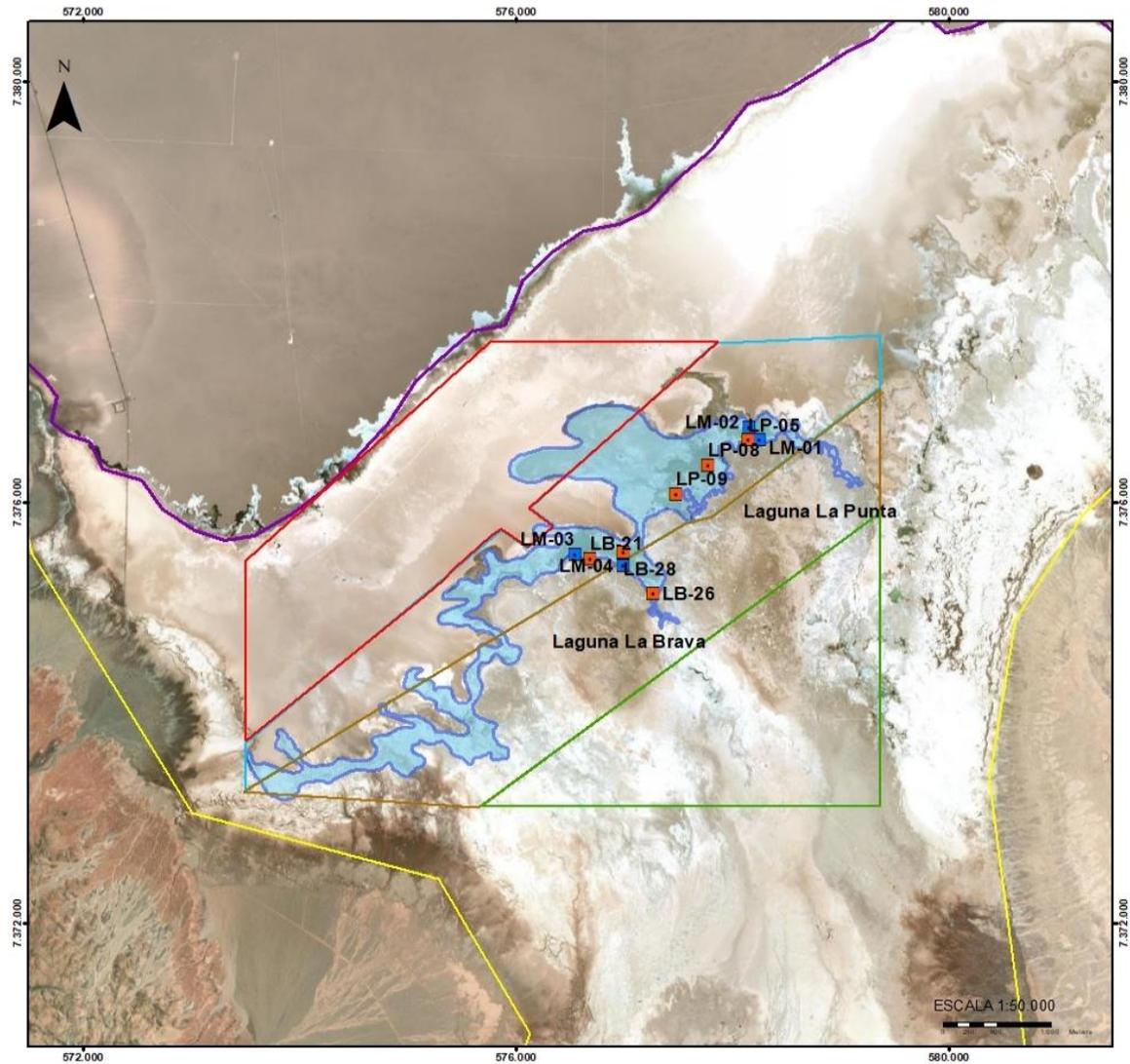
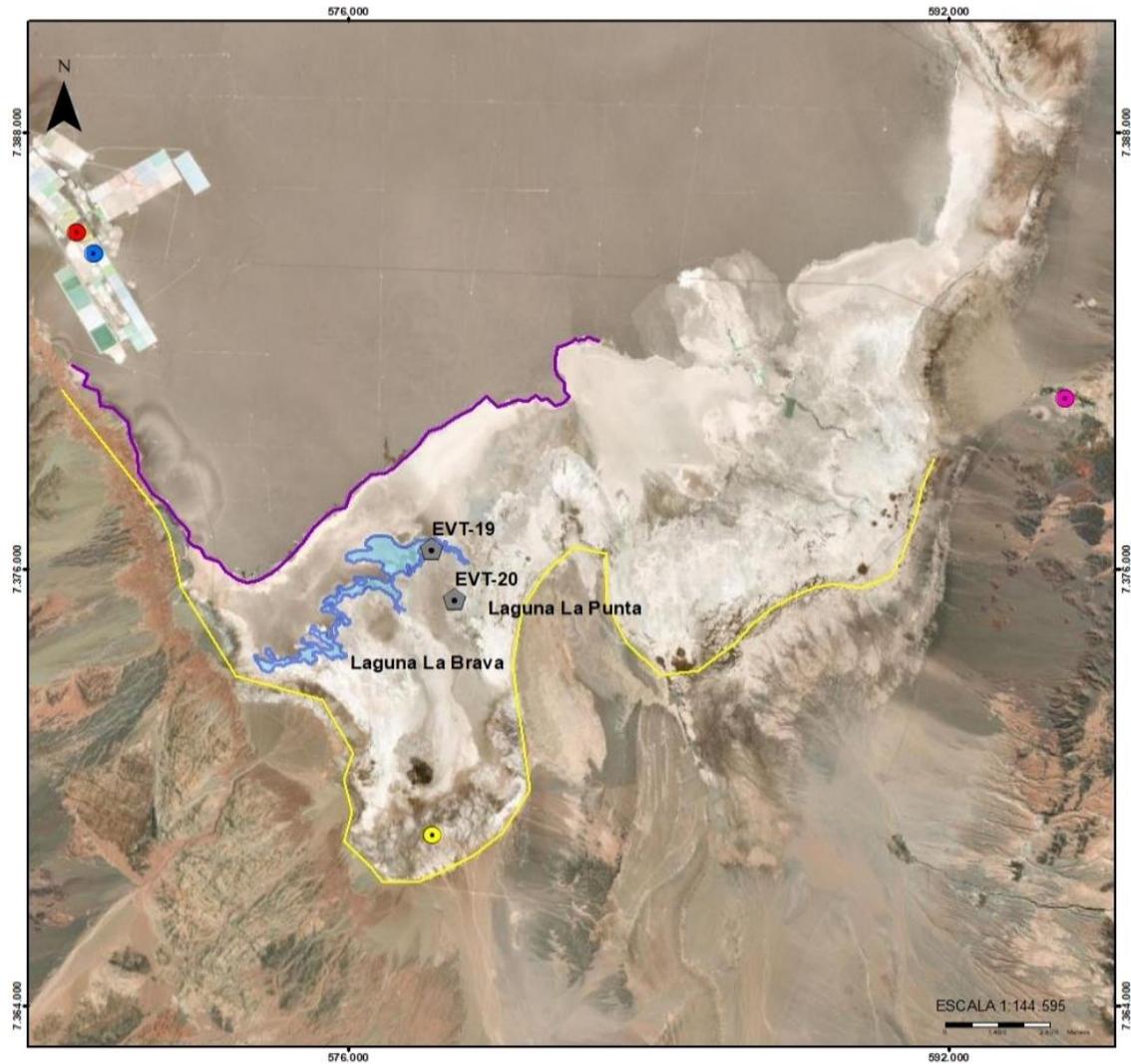


Figura 6-2 Limnímetros y monitoreo de niveles lagunares según componente espacial

Fuente: Elaboración propia.



**ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y MONITOREO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN**

SIMBOLOGÍA	
<b>Estaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EM-Rockwood</li> <li>● EM-SCL</li> <li>● EM-Tilopozo</li> <li>● EM-Peine</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▣ Lagunas</li> <li>▭ Núcleo del Salar</li> <li>▭ Zona marginal</li> </ul>

ELABORADO POR AQUIST Y AMAKAIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.**

**DATOS CARTOGRÁFICOS**  
PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR

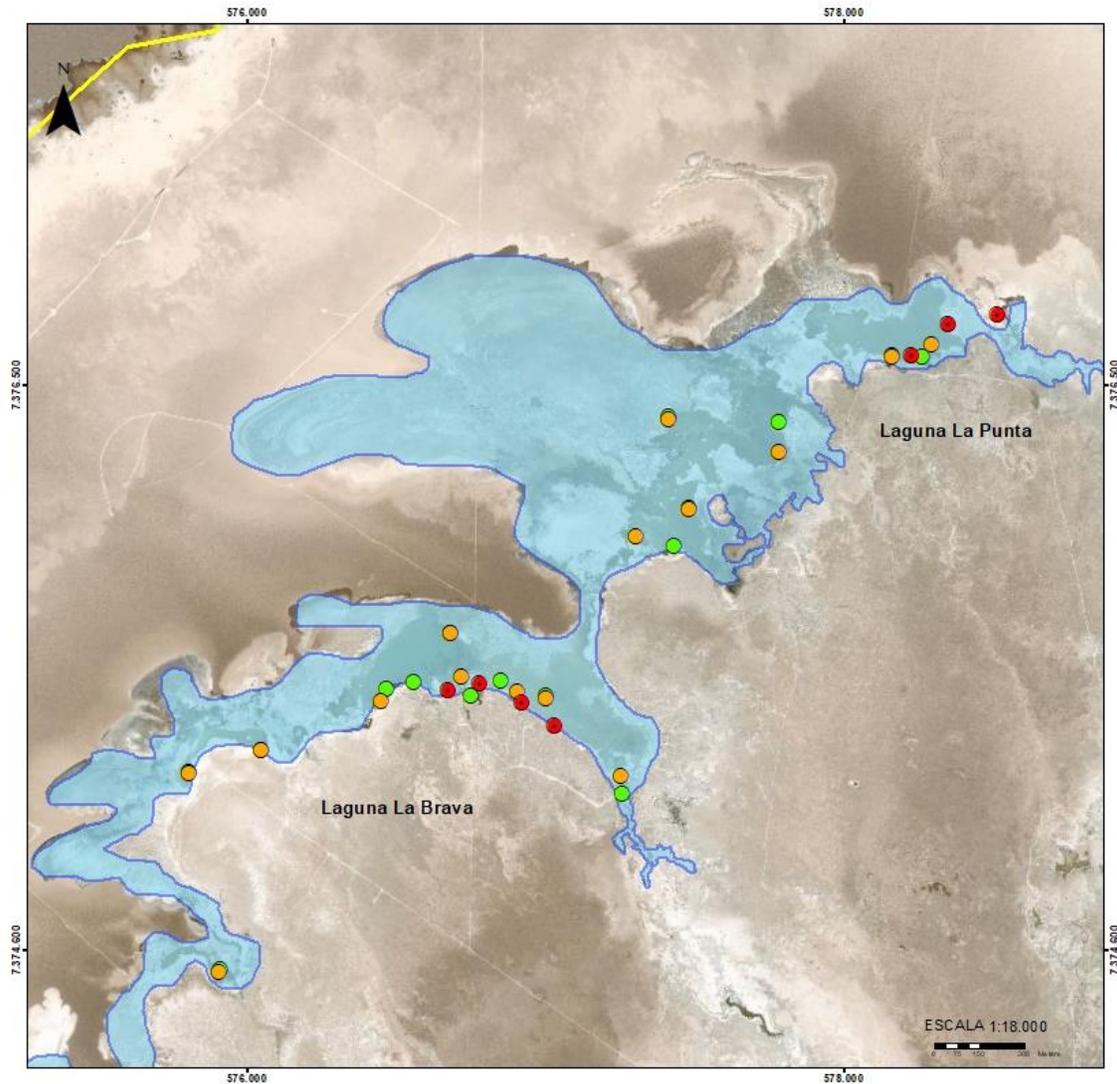
**DATOS GEODÉSICOS**  
DATUM: WGS 1984

FECHA: 23-09-2020



Figura 6-3 Estaciones meteorológicas y puntos de monitoreo de evapotranspiración

Fuente: Elaboración propia



<b>COMPONENTES BIÓTICOS (CALIDAD DEL AGUA)</b>	
<b>SIMBOLOGÍA</b>	
<span style="color: red;">●</span>	Puntos de muestreo Albemarle
<span style="color: orange;">●</span>	Puntos de muestreo MEL
<span style="color: green;">●</span>	Puntos de muestreo CMZ
<span style="color: lightblue;">■</span>	La Punta y La Brava
ELABORADO POR AQUIST Y AMAKÁIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE	

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.**

DATOS CARTOGRÁFICOS  
PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR

DATOS GEODÉSICOS  
DATUM: WGS 1984

FECHA: 29-05-2020



Figura 6-4 Puntos de Muestreo de Datos Acuáticos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-7 Localización de estaciones meteorológicas y puntos de monitoreo de evapotranspiración

Estaciones y puntos de medición	Variables meteorológicas/ Monitoreo evapotranspiración	Coordenadas UTM (WGS 84/19S)		Período de datos	
		UTM E	UTM N	Inicio	Término
EM-SCL	Precipitación y Temperatura diaria	569.244	7.384.662	13/01/2009	28/4/2016
	Precipitación mensual	569.244	7.384.662	01/1997	04/2016
	Temperatura mensual	569.244	7.384.662	01/2009	04/2016
EM-Rockwood	Precipitación y Temperatura diaria	568.772	7.385.236	28/4/2016	31/12/2019
	Precipitación y Temperatura mensual	568.772	7.385.236	05/2016	12/2019
EM-Tilopozo	Precipitación diaria	578.068	7.368.320	01/5/2010	31/12/2016
	Precipitación mensual	578.068	7.368.320	01/2008	12/2017
	Temperatura mensual	578.068	7.368.320	01/2010	12/2017
EM-Peine	Precipitación y temperatura mensual	596.017	7.380.388	01/1985	12/2019
EVT- 19	Evapotranspiración	578.228	7.376.559	05/2013	12/2019
EVT- 20	Evapotranspiración	578.855	7.375.174	05/2013	12/2019

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-8 Localización de los piezómetros

Piezómetro	Coordenadas UTM (Datum WGS 84/Huso 19S)		Cota Collar (msnm)	Tipo	Laguna	Empresa
	UTM E	UTM N				
BA-01	574.964	7.375.461	2300,924	Barreno	La Brava	ALB
BA-02	575.305	7.375.003	2301,369	Barreno	La Brava	ALB
BA-03	575.594	7.374.516	2301,457	Barreno	La Brava	ALB
BA-04	576.096	7.374.776	2301,346	Barreno	La Brava	ALB
BA-05	576.373	7.375.324	2301,085	Barreno	La Brava	ALB
BA-06	576.120	7.375.626	2301,405	Barreno	La Brava	ALB
BA-07	578.406	7.376.692	2300,881	Barreno	La Punta	ALB
BA-08	577.783	7.375.887	2301,149	Barreno	La Punta	ALB
BA-09	575.545	7.376.062	2300,787	Barreno	La Brava	ALB
BA-10	576.268	7.376.317	2300,791	Barreno	La Punta	ALB
BA-11	576.254	7.376.750	2300,928	Barreno	La Punta	ALB
BA-12	576.707	7.376.759	2300,999	Barreno	La Punta	ALB
BA-13	577.081	7.376.565	2,301.084	Barreno	La Punta	ALB
BA-14	576.842	7.376.029	2,301.375	Barreno	La Punta	ALB
BA-15	576.968	7.375.650	2,301.132	Barreno	La Punta	ALB
BA-16	577.746	7.375.405	2,301.777	Barreno	La Brava	ALB
BA-25	576.424	7.374.761	2,301.472	Barreno	La Brava	ALB
MP-01A	578.647	7.376.429	2.301,23	Multipiezómetro	La Punta	ALB
MP-01B	578.650	7.376.430	2.301,19	Multipiezómetro	La Punta	ALB
MP-01C	578.646	7.376.429	2.301,23	Multipiezómetro	La Punta	ALB
MP-03A	577.651	7.373.947	2.302,64	Multipiezómetro	La Brava	ALB
MP-03B	577.653	7.373.947	2.302,63	Multipiezómetro	La Brava	ALB

Piezómetro	Coordenadas UTM (Datum WGS 84/Huso 19S)		Cota Collar (msnm)	Tipo	Laguna	Empresa
	UTM E	UTM N				
MP-03C	577.650	7.373.947	2.302,64	Multipiezómetro	La Brava	ALB
TPZ-13C	576.859	7.375.764	2.300,72	Piezómetro	La Brava	MEL
TPZ-7B	577.816	7.373.654	2.302,78	Piezómetro	La Brava	MEL
TPZ-10	576.888	7.373.301	2.302,54	Piezómetro	La Brava	MEL
L12-2	578.896	7.375.144	2.303,84	Lisímetro	La Punta	SQM
L12-3	576.268	7.374.917	2.302,67	Lisímetro	La Brava	SQM

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-9 Localización de limnímetros y niveles lagunares.

Limnómetro Y reglillas	Coordenadas UTM (Datum WGS 84/Huso 19S)		Cota collar msnm	Inicio	Término	Empresa
	UTM E	UTM S				
LB -21 (A)	576.691	7.375.470	N/A	01/1998	10/2018	MEL
LB- 28 (B)	576.997	7.375.525	N/A	01/1998	10/2018	MEL
LB- 26 (C)	577.271	7.375.138	N/A	01/1998	10/2018	MEL
LP- 09 (D)	577.480	7.376.082	N/A	01/1998	10/2018	MEL
LP- 05 (F)	578.155	7.376.594	N/A	01/1998	10/2018	MEL
LP-08 (E)	577.784	7.376.359	N/A	01/1998	10/2018	MEL
Tilopozo (H)	577.748	7.369.366	N/A	01/1998	10/2018	MEL
LM-01	578.259	7.376.599	2.300,33	01/05/2016	07/12/2019	ALB
LM-02	578.162	7.376.719	2.300,795	01/05/2016	07/12/2019	ALB
LM-03	576.553	7.375.507	2.300,576	01/05/2016	07/12/2019	ALB
LM-04	576.992	7.375.404	2.300,934	01/05/2016	07/12/2019	ALB

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-10 Coordenadas de puntos de muestreo de calidad del agua.

Componente espacial	Estación	Coordenadas UTM (Datum WGS 84/Huso 19S)		Empresa
		UTM E	UTM N	
		La_Brava	LBLB-01	
La_Brava	LBLB-02	576.445	7.375.437	MEL
La_Brava	LBLB-03	576.717	7.375.517	MEL
La_Brava	LBLB-21	577.250	7.375.186	MEL
La_Brava	LBLB-26	577.000	7.375.447	MEL
La_Brava	LBLB-28	576.904	7.375.468	MEL
La_Brava	LBLB-04	576.043	7.375.273	MEL
La_Brava	LB-Nueva-1	575.802	7.375.193	MEL
La_Brava	LB-Nueva-2	575.904	7.374.527	MEL
La_Brava	LB-1	576.677	7.375.474	ALB
La_Brava	LB-2	576.782	7.375.494	ALB
La_Brava	LB-3	576.921	7.375.432	ALB

Componente espacial	Estación	Coordenadas UTM		Empresa
		(Datum WGS 84/Huso 19S)		
		UTM E	UTM N	
La_Brava	LB-4	577.034	7.375.354	ALB
La_Brava	LB01	575.907	7.374.537	CZM
La_Brava	LB02	575.800	7.375.198	CZM
La_Brava	LB03	576.045	7.375.273	CZM
La_Brava	LB04	576.463	7.375.478	CZM
La_Brava	LB05	576.558	7.375.500	CZM
La_Brava	LB06	576.681	7.375.666	CZM
La_Brava	LB07	576.747	7.375.457	CZM
La_Brava	LB08	576.850	7.375.506	CZM
La_Brava	LB09	577.000	7.375.455	CZM
La_Brava	LB10	577.256	7.375.126	CZM
La_Punta	LBLP-01	578.297	7.376.635	MEL
La_Punta	LBLP-02	577.784	7.376.273	MEL
La_Punta	LBLP-03	577.480	7.376.080	MEL
La_Punta	LBLP-04	577.303	7.375.991	MEL
La_Punta	LBLP-05	578.160	7.376.592	MEL
La_Punta	LBLP-08	577.414	7.376.383	MEL
La_Punta	LP-22	578.517	7.376.737	ALB
La_Punta	LP-23	578.230	7.376.599	ALB
La_Punta	LP-24	578.352	7.376.703	ALB
La_Punta	LP01	577.430	7.375.958	CZM
La_Punta	LP02	577.479	7.376.084	CZM
La_Punta	LP03	577.414	7.376.394	CZM
La_Punta	LP04	577.784	7.376.376	CZM
La_Punta	LP05	578.160	7.376.597	CZM
La_Punta	LP06	578.262	7.376.595	CZM

Fuente: Elaboración propia

## 6.2.1. Variables forzantes

### 6.2.1.1. Temperatura

En este capítulo se presenta el registro histórico de temperaturas de las estaciones meteorológicas SCL y Rockwood, Tilopozo y Peine. Las observaciones de temperatura promedio mensual faltantes se completaron a partir de las observaciones de temperatura diaria promediados por mes.

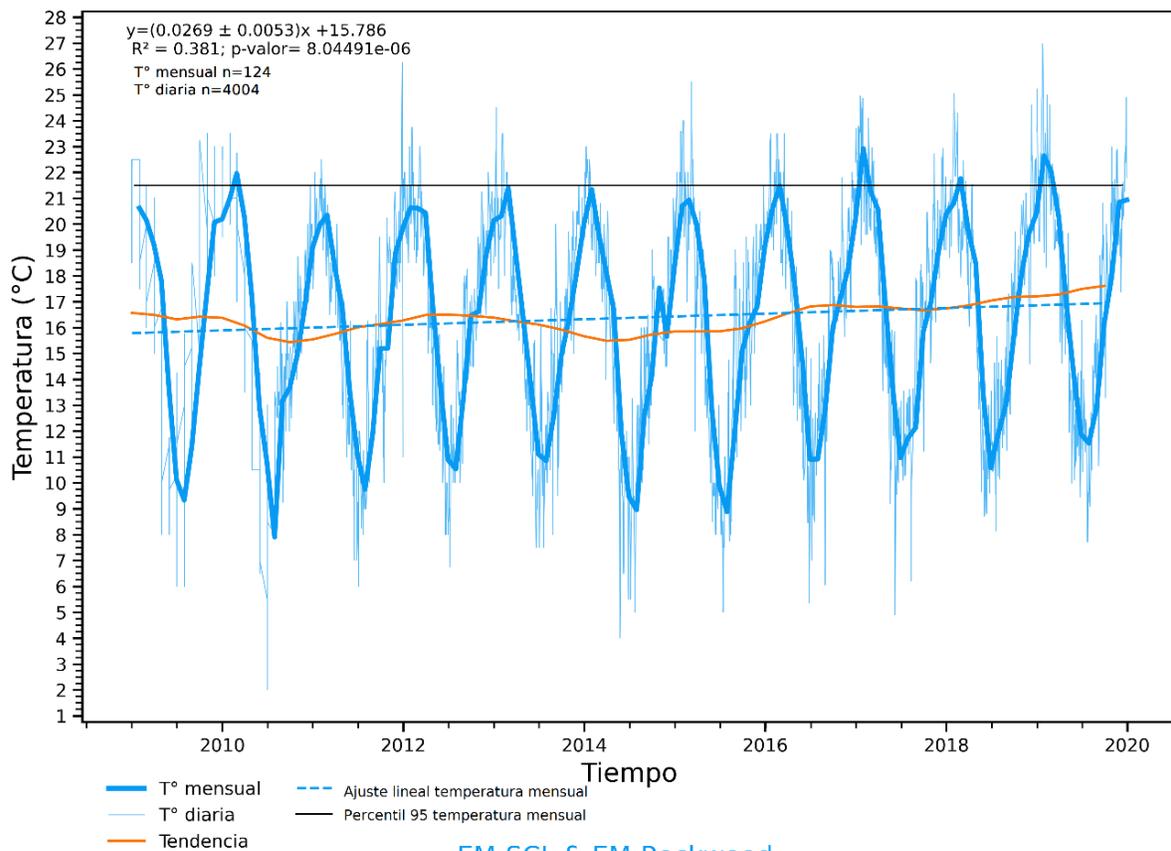


Figura 6-5 Temperatura media mensual y diaria, 2009 a 2019, EM-SCL y EM-Rockwood

Fuente: Elaboración propia

En

la

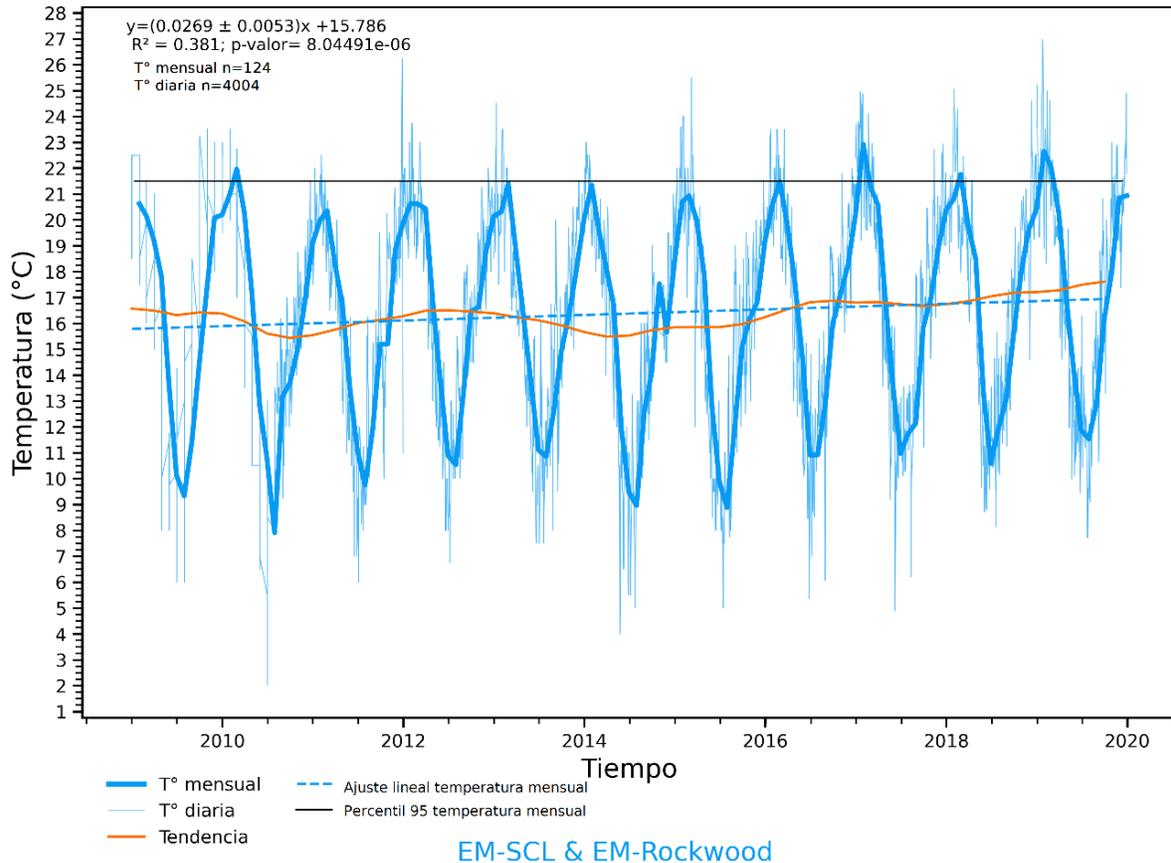


Figura 6-5 se presentan los valores de temperatura media mensual y diarios obtenidos desde la estación Albemarle (EM-SCL y EM-Rockwood) con un período de registro que va desde el año 2009 a 2019. Se observa que las temperaturas presentan una marcada diferencia entre los valores estacionales, donde las temperaturas medias mensuales máximas se registran en verano y las medias mensuales mínimas en invierno. Se determinó la curva de tendencia y el ajuste lineal, mediante lo cual es posible apreciar que existe un aumento significativo en las temperaturas para los años en los que se tiene registro ( $p\text{-valor} < 0,001$ ;  $r^2 = 0,381$ ;  $m=0,027$ ). Sumado a lo anterior, el ajuste lineal corrobora que para la EM-Rockwood & EM-SCL, existe un incremento significativo de temperatura de  $0,108 \text{ }^\circ\text{C}$  por año, desde el año 2009 al 2019 (valor del ajuste lineal en tiempo inicial (verano de 2009) =  $15,79^\circ\text{C}$ ; valor del ajuste lineal en tiempo final (primavera de 2019) =  $16,94^\circ\text{C}$ ).

Dentro del registro histórico de temperaturas en EM-SCL & EM-Rockwood, el período más caluroso corresponde a verano de 2019 ( $21,64 \text{ }^\circ\text{C}$ ), y a su vez el año 2019 corresponde al año con la mayor temperatura media anual ( $17,33 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Sumado a lo anterior, enero de 2019 presenta el máximo histórico de temperatura diaria ( $26,97^\circ\text{C}$ ). Por otro lado, el período con mínima temperatura corresponde al invierno de 2010 ( $11,56^\circ\text{C}$ ) y una temperatura media mensual para junio del mismo año de  $7,91^\circ\text{C}$ .

Con respecto a EM-Tilopozo, las observaciones de temperatura mensual disponibles corresponden al período entre los años 2010 a 2017, los que son representados en la Figura 6-6.

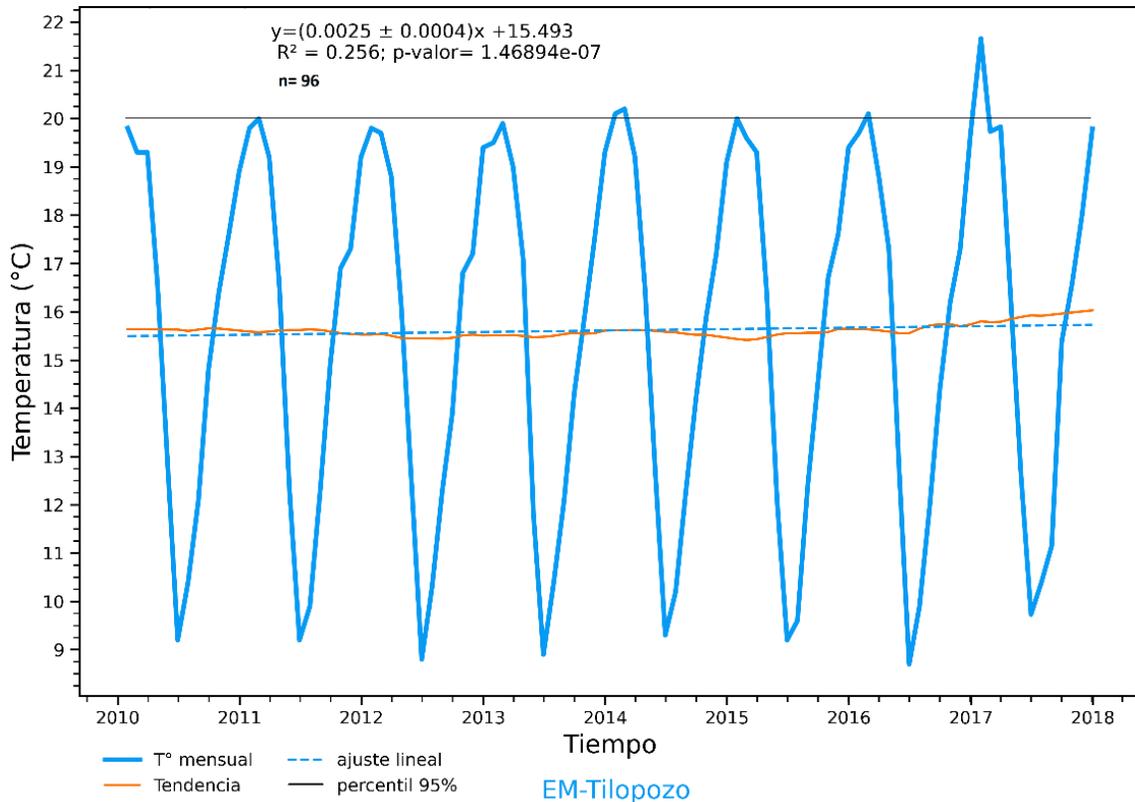


Figura 6-6 Temperatura media mensual EM-Tilopozo, 2010 a 2017

Fuente: Elaboración propia

La curva de tendencia para esta estación meteorológica muestra menor variación de temperatura (desviación estándar, SD, = 0,07°C) que la observada en EM-SCL y EM-Rockwood (SD = 0,56 °C). El ajuste lineal resultante sugiere que existe un aumento significativo de temperatura desde el año 2010 al 2017 (p-valor < 0,001;  $r^2=0,256$ ;  $m=0,0025$ ), donde la pendiente de éste muestra que los valores de temperatura media mensual de EM-Tilopozo han aumentado 0,032°C por año (valor del ajuste lineal en tiempo inicial (verano de 2010) = 15,49°C; valor del ajuste lineal en tiempo final (primavera de 2017) = 15,75 °C). El máximo histórico estacional se observa en verano de 2017 (20,41°C), mientras que el mínimo histórico ocurre en invierno de 2016 (12,10°C).

En relación a la EM-Peine, se dispone de observaciones desde el año 1984 a 2019, con un período sin información entre los años 1996 y 1999.

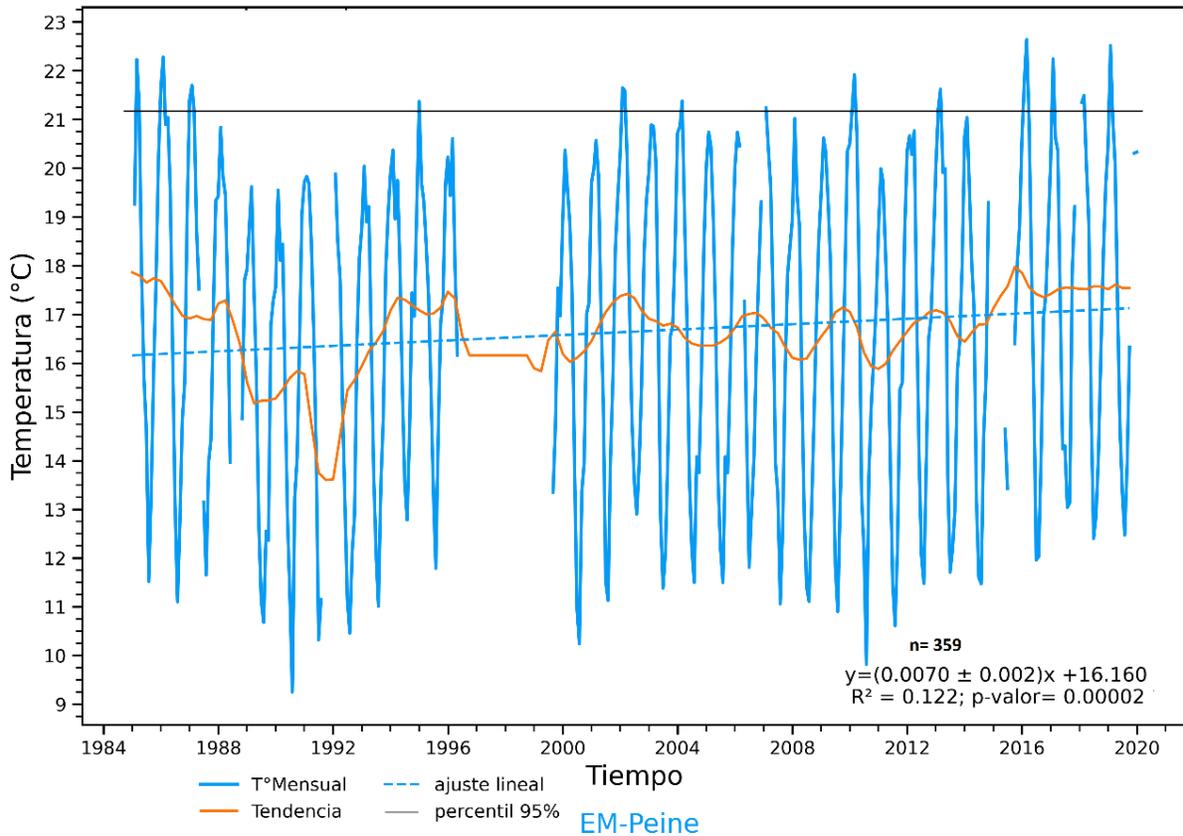


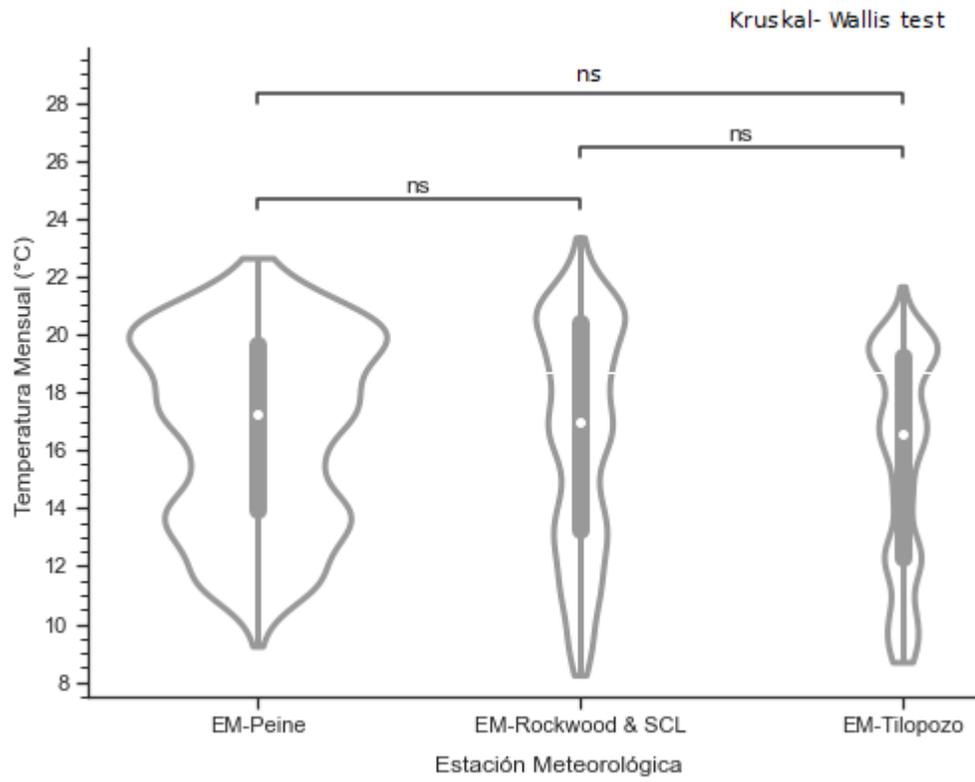
Figura 6-7 Temperatura media mensual EM-Peine, 1985 a 2019

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-7 se presentan los valores de temperaturas medias mensuales, para las cuales se determina la curva de tendencia y el ajuste lineal, siendo este último de pendiente positiva significativa desde 1985 a 2019 ( $p\text{-valor} < 0,001$ ;  $r^2 = 0,122$ ;  $m=0.007$ ). La curva de tendencia indica que entre los años 1984 y 1991 se vio una disminución en las temperaturas y posteriormente, entre los años 1991 y 2019, se aprecia un aumento progresivo que se agudiza luego de 2016.

Se observa que para EM-Peine existe una variación estacional en las temperaturas, las que aumentan en verano y disminuyen en invierno (Figura 6-7). Además, se observa que el máximo estacional histórico tiene lugar en verano de 2016 (21.81°C), mientras que el mínimo estacional histórico ocurre en invierno del año 1990 (11.15°C; Figura 6-7).

Finalmente, con el objeto de comparar el comportamiento de los datos entre las tres estaciones estudiadas, se realiza un boxplot tipo violín para cada una de las estaciones, considerando los valores de temperaturas medias



mensuales (

Figura 6-8).

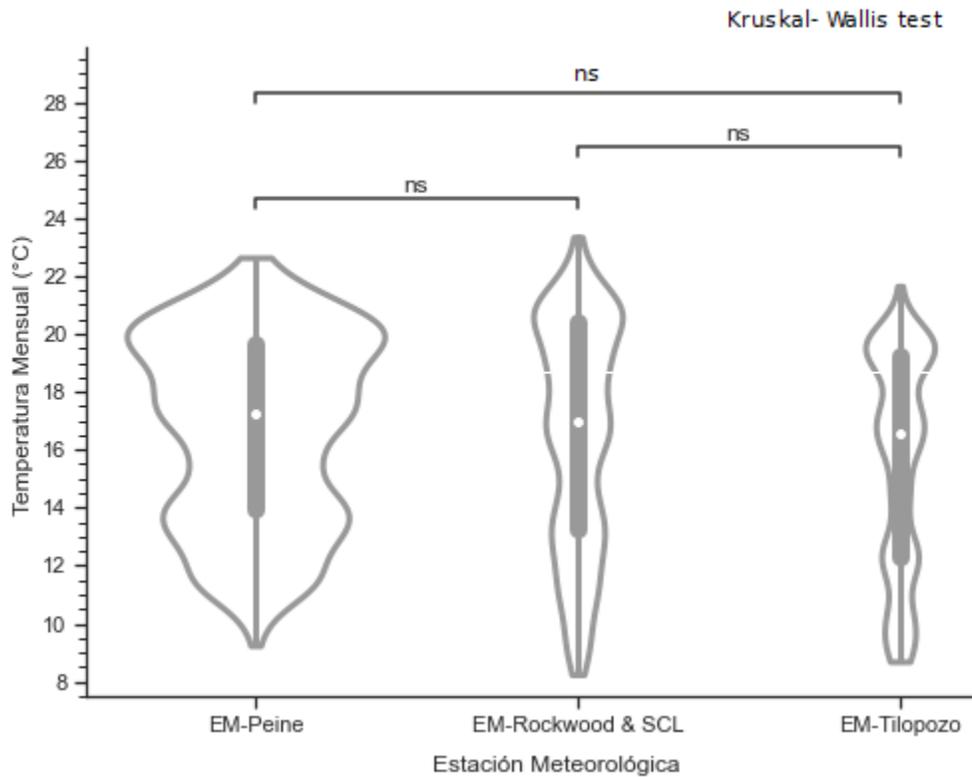


Figura 6-8 Boxplot de temperaturas mensuales de EM-Peine, EM-Rockwood, SCL y EM-Tilopozo.

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un KWtest con posterior Dtest para las temperaturas mensuales de cada estación meteorológica, como fue detallado en 5.2.2.2, obteniendo que no hay diferencia significativa entre estos conjuntos.

La media para cada conjunto de datos es representada por un punto blanco en la parte central de los gráficos, además, los límites de las líneas gruesas representan los cuartiles Q1 y Q3 de cada conjunto de datos.

El ancho de los gráficos para cada estación indica la densidad de datos que se posee en cada intervalo de valores de temperatura. A partir de esto se puede concluir que la mayor densidad de observaciones, en cada

una de las estaciones, se encuentra en el cuartil Q3, con valores entre 19°C y 20.5°C (

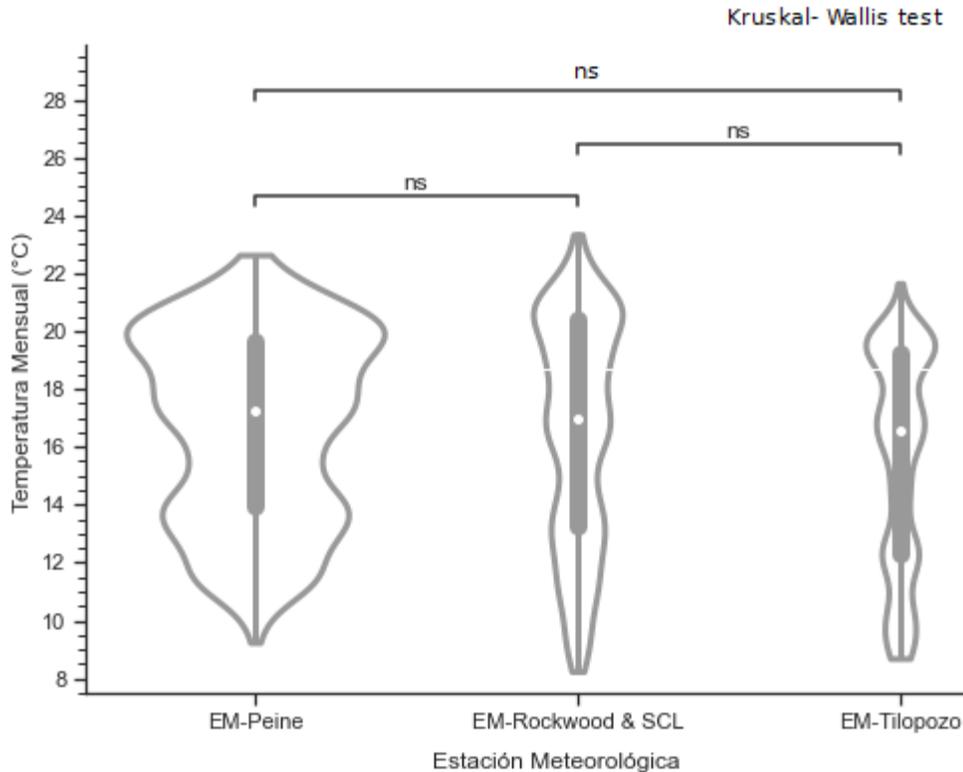


Figura 6-8).

Como indicador de la estacionalidad de la temperatura, se encontró que para EM-Peine, al aplicar el KWtest ( $p$ -valor  $< 0,001$ ), y el Dtest como prueba *post-hoc*, para el promedio de temperaturas mensuales separados por estación de año, la temperatura es significativamente más alta para la temporada de verano (Dtest  $p$ -valor  $< 0,001$  para primavera, otoño e invierno), primavera es significativamente mayor que otoño e invierno (Dtest  $p$ -valor  $< 0,001$  para otoño e invierno), y las temperaturas de otoño e invierno no difieren significativamente (Dtest  $p$ -valor  $> 0,05$ ).

Finalmente, en la

Tabla 6-11, se presentan los valores de temperatura media anual para EM-SCL & EM-Rockwood, EM-Peine y EM-Tilopozo.

Tabla 6-11 Temperatura media anual para EM-SCL & EM-Rockwood, EM-Peine y EM-Tilopozo.

Estación	Temperatura media anual (°C)
EM-SCL & EM-Rockwood	16,44
EM-Peine	16,92
EM-Tilopozo	15,60

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1.2. Precipitación

En este subcapítulo, se presentan y analizan los registros históricos de precipitaciones acumuladas mensuales de EM-SCL & EM-Rockwood, EM-Tilopozo y EM-Peine. Los datos de precipitación acumulada mensual faltantes, se completaron a partir de la suma mensual de las mediciones directas de precipitación diaria.

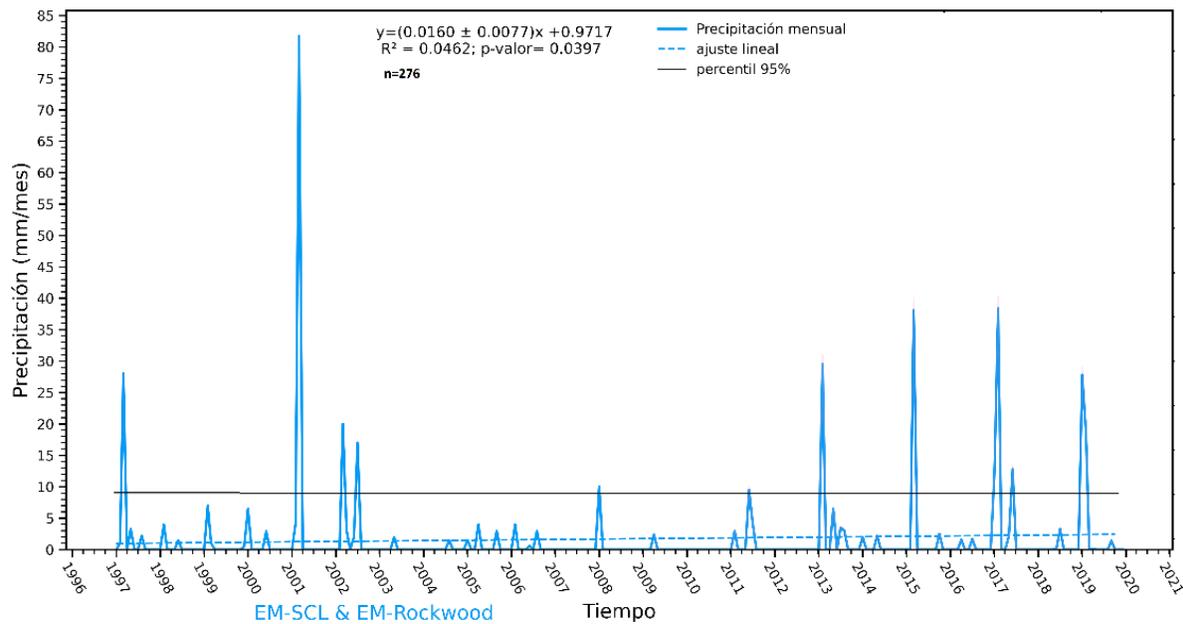


Figura 6-9 Precipitación acumulada mensual 1997 a 2019, EM-SCL y EM-Rockwood

Fuente: Elaboración propia

Los registros de EM-SCL & EM-Rockwood, se agruparon en solo un conjunto, presentando un registro continuo de precipitaciones acumuladas mensuales desde el año 1997 hasta 2019. En el presente registro es posible reconocer 6 eventos de precipitación con valores iguales o superiores a 25 mm/mes, y todos durante la temporada de verano para los años 1997, 2001, 2013, 2015, 2017 y 2019 (Figura 6-9). Entre los años 2003 y 2013 se aprecia un período donde los eventos de precipitaciones mensuales no superan mm/mes. Sumado a lo anterior, el 95% de los meses se presentan precipitaciones iguales o menores a 9 mm/mes.

El análisis de series de tiempo para EM-SCL & EM-Rockwood indica que los valores de precipitación tienen un pobre ajuste a un modelo lineal ya que el  $r^2$  es menor a 0,10 ( $p$ -valor  $< 0,05$ ;  $r^2=0,046$ ;  $m=0,016$ ; Figura 6-9). Por otro lado, el KWtest ( $p$ -valor  $< 0,001$ ), y posterior Dtest corrobora que las principales lluvias ocurren durante el verano, aunque estadísticamente indistinguible del otoño (Dtest  $p$ -valor  $< 0,001$  con primavera;  $p$ -valor  $< 0,05$  con invierno,  $p$ -valor  $> 0,05$  con otoño), seguido por las temporadas de invierno y otoño, siendo estos estadísticamente indistinguibles (Dtest  $p$ -valor  $< 0,001$  para otoño con primavera;  $p$ -valor  $< 0,05$  para invierno con primavera;  $p$ -valor  $> 0,05$  para invierno con otoño), dejando a la primavera como la temporada significativamente más seca (Figura 6-9).

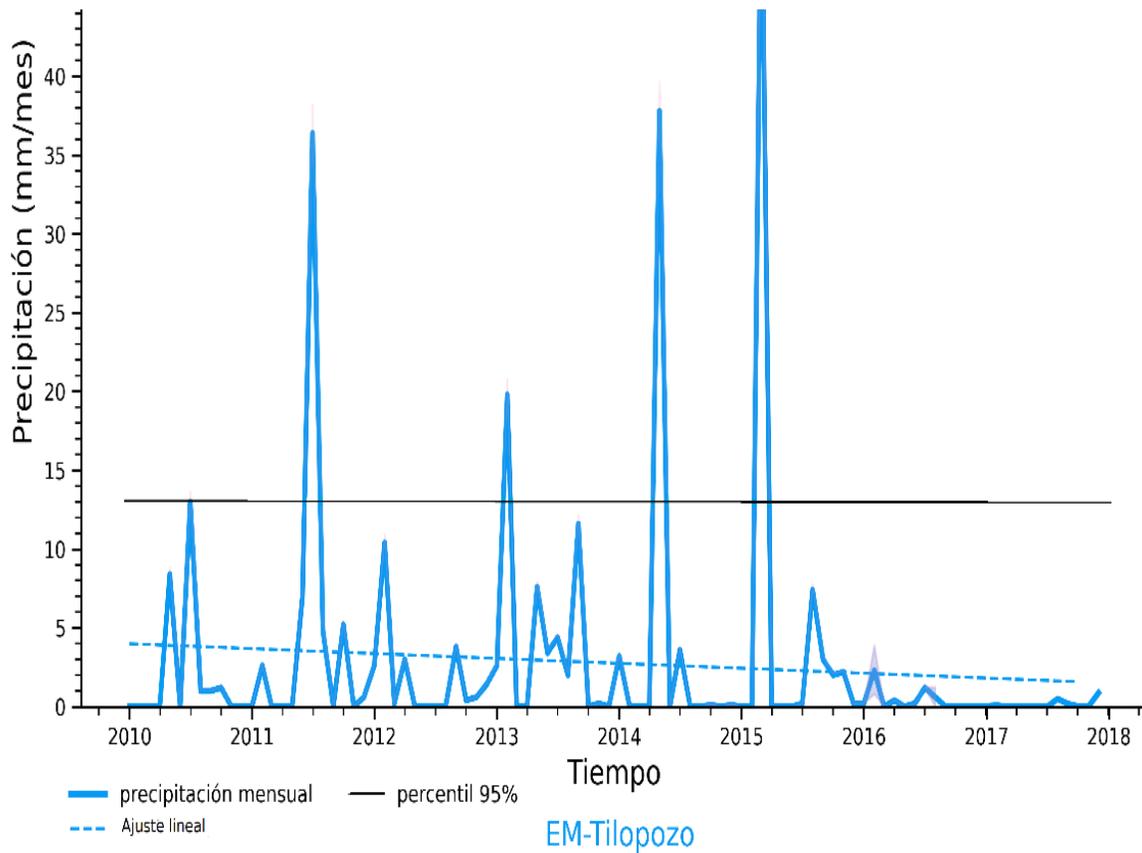


Figura 6-10 Precipitación acumulada mensual, 2010 a 2017, EM-Tilopozo

Fuente: Elaboración propia

La EM-Tilopozo presenta un registro de precipitaciones acumuladas mensuales desde el año 2010 al 2017, donde es posible reconocer 4 eventos de precipitaciones para los años 2011, 2013, 2014 y 2015 con valores superiores a 20 mm/mes. Por otro lado, el 95% de los períodos estudiados presentan precipitaciones iguales o menores a 13 mm/mes (Figura 6-10).

El KWtest indica que hay diferencias significativas entre las estaciones del año ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), pero al realizar el Dtest se encuentra que ningún par de estaciones difieren significativamente entre sí (Figura 6-10).

El análisis de series de tiempo de EM-Tilopozo revela un ajuste lineal con mayor correspondencia al modelo lineal y cuya pendiente es significativamente negativa, lo que implica una tendencia a la disminución de las precipitaciones ( $p$ -valor  $< 0,05$ ;  $r^2=0,13$ ;  $m=-0,078$ ).

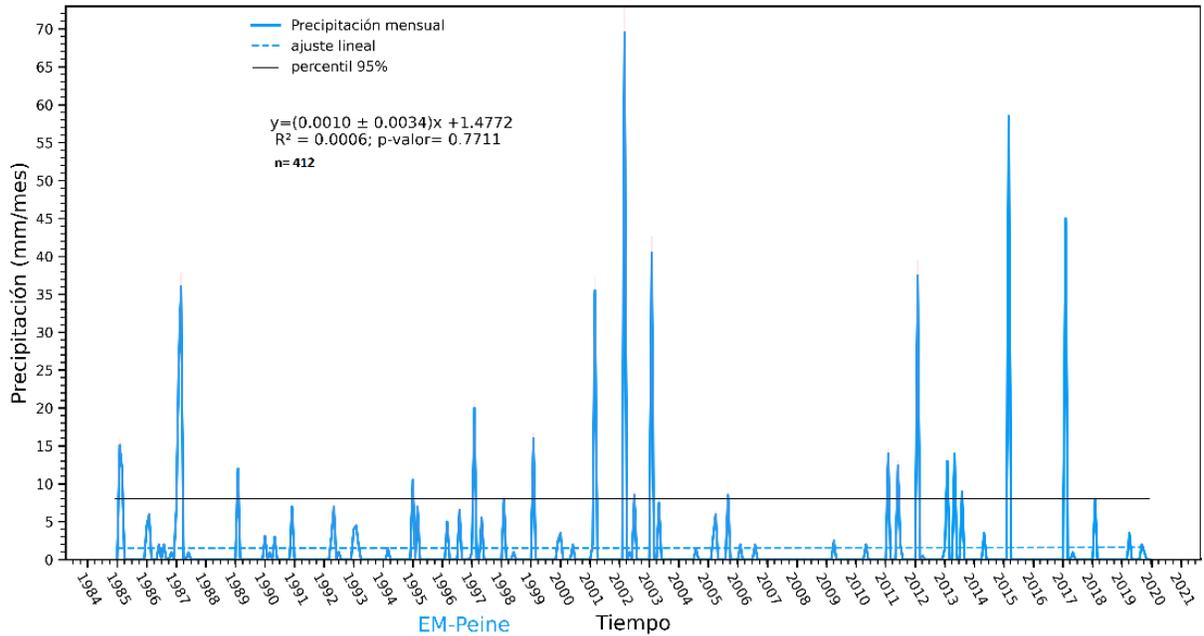


Figura 6-11 Precipitación acumulada mensual, 1985 a 2019, EM-Peine

Fuente: Elaboración propia

EM-Peine posee un registro de precipitaciones acumuladas mensuales, desde del año 1985 hasta 2019, donde es posible reconocer eventos de precipitación para los años 1987, 2001, 2002, 2003, 2012, 2015 y 2017 con valores superiores a 35 mm/mes. Por otro lado, se reconocen dos períodos con escasas precipitaciones, durante 1989 – 1997 y 2003 – 2010 (Figura 6-11). Sumado a lo anterior, el 95% de los valores de precipitación mensual se encuentran por debajo de los 8.22 mm/mes.

El análisis de varianza para esta estación meteorológica (Figura 6-12) revela una estacionalidad similar a lo visto para EM-SCL & EM-Rockwood, con un p-valor < 0,001 para el KWtest. Específicamente, las precipitaciones de verano son significativamente mayores que todas las otras temporadas (Dtest p-valor > 0,05 con otoño; p-valor < 0,001 con invierno y también con primavera), seguido por otoño cuyas precipitaciones son mayores que las de primavera, pero indistinguibles de las precipitaciones de invierno (Dtest p-valor < 0,05 con primavera; p-valor > 0,05 con invierno). La acumulación mensual de precipitaciones es estadísticamente indistinguible entre las temporadas de invierno y primavera (Dtest p-valor > 0,05).

El análisis de series de tiempo de EM-Peine resulta en un  $r^2$  menor a 0,10, que consideramos como una pobre correspondencia a un modelo lineal, y además un p-valor > 0,05, implicando que la pendiente del ajuste es

indistinguible de cero ( $p$ -valor  $> 0,05$ ;  $r^2=0006$ ;  $m= 0.001$ ). Esto sugiere que no hay evidencia de un aumento o disminución de precipitaciones registradas en EM-Peine.

Tabla 6-12. Precipitación media anual.

Estación	Precipitación media (mm/año)
EM-SCL & EM-Rockwood	19.61
EM-Peine	24.66
EM-Tilopozo	34.48

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 6-12 presenta los valores de precipitación acumulada media anual para EM-SCL/Rockwood, EM-Peine y EM-Tilopozo. Es posible concluir que las precipitaciones medias anuales oscilan entre 19.61 y 34.48 mm/año, siendo menores en EM-SCL & Rockwood (núcleo del salar) y mayores en EM-Peine y EM-Tilopozo

que se encuentran fuera de la zona marginal del salar (

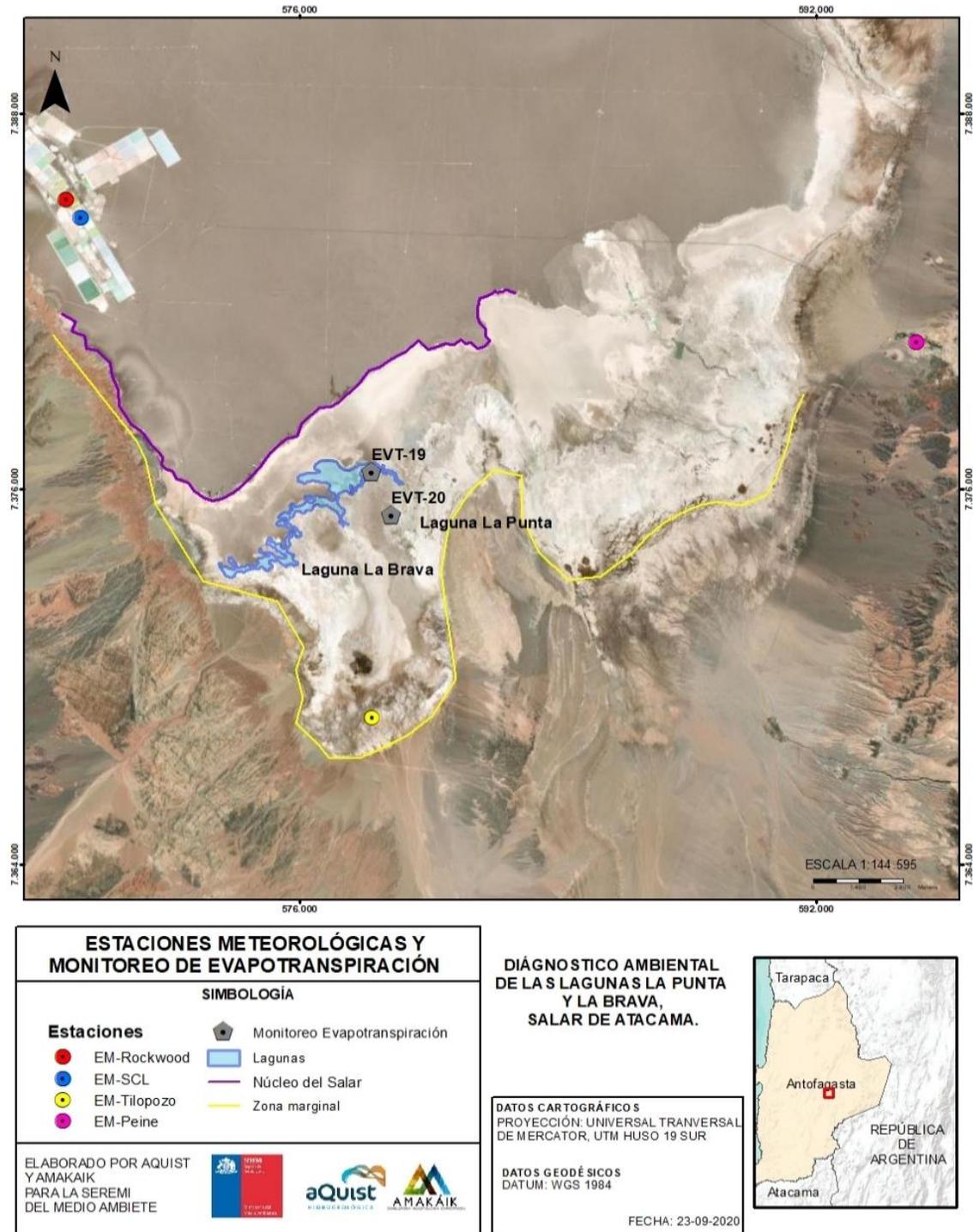


Figura 6-3).

Basado en el KWtest, cuyo p-valor fue  $<0,001$ , es posible determinar que las mayores precipitaciones mensuales se registraron en EM-Tilopozo (Dtest p-valor  $< 0,001$  con EM-Peine y también con EM-SCL/Rockwood). Las precipitaciones registradas en EM-Peine y EM-SCL/Rockwood son estadísticamente indistinguibles (Dtest p-valor  $>0,05$ ). El promedio anual de precipitaciones se puede ver en Tabla 6-12.

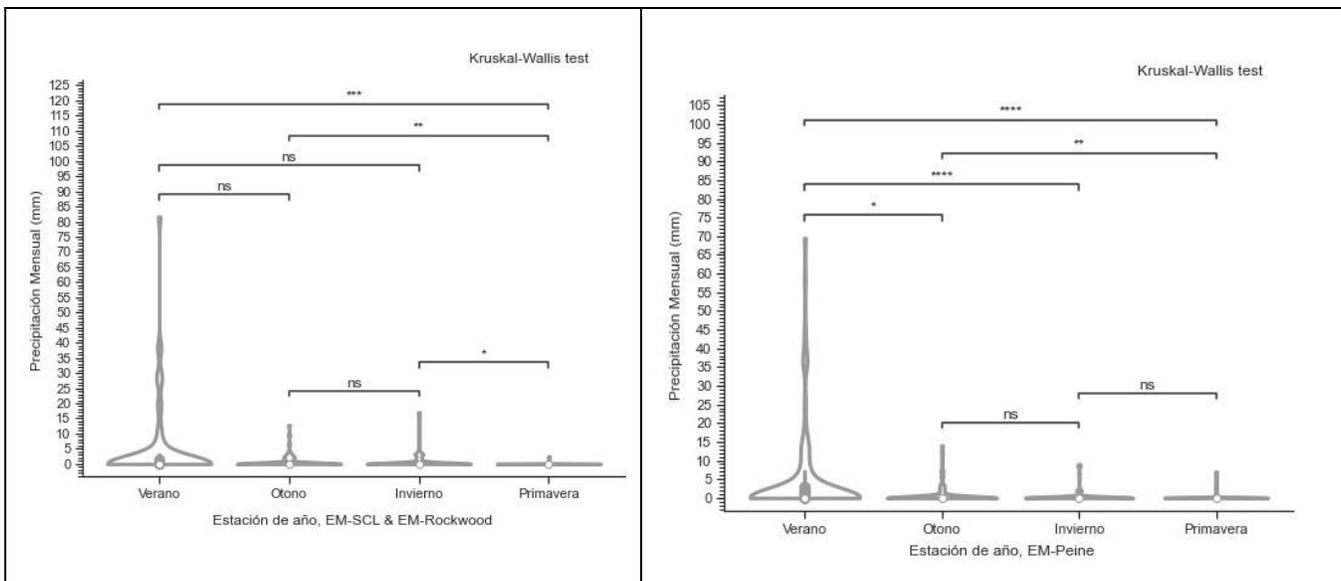
Dentro de los boxplot presentados en la Figura 6-13, los índices \*, \*\* y ns hacen referencia al valor de significancia entre los valores estudiados.

Tabla 6-13. Rango de p-valor para boxplot realizados en **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida..**

Leyenda anotación de p-valor	
ns	0,05 – 1
*	0,01 – 0,05
**	0,001 – 0,01
***	0,0001 – 0,001
****	$\leq 0,0001$

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-12 se presentan los boxplot para las tres estaciones en estudio: EM-SCL & EM-Rockwood, EM-Peine y EM-Tilopozo. Los valores de precipitación utilizados corresponden a acumulados mensuales y los boxplot fueron realizados según estacionalidad.



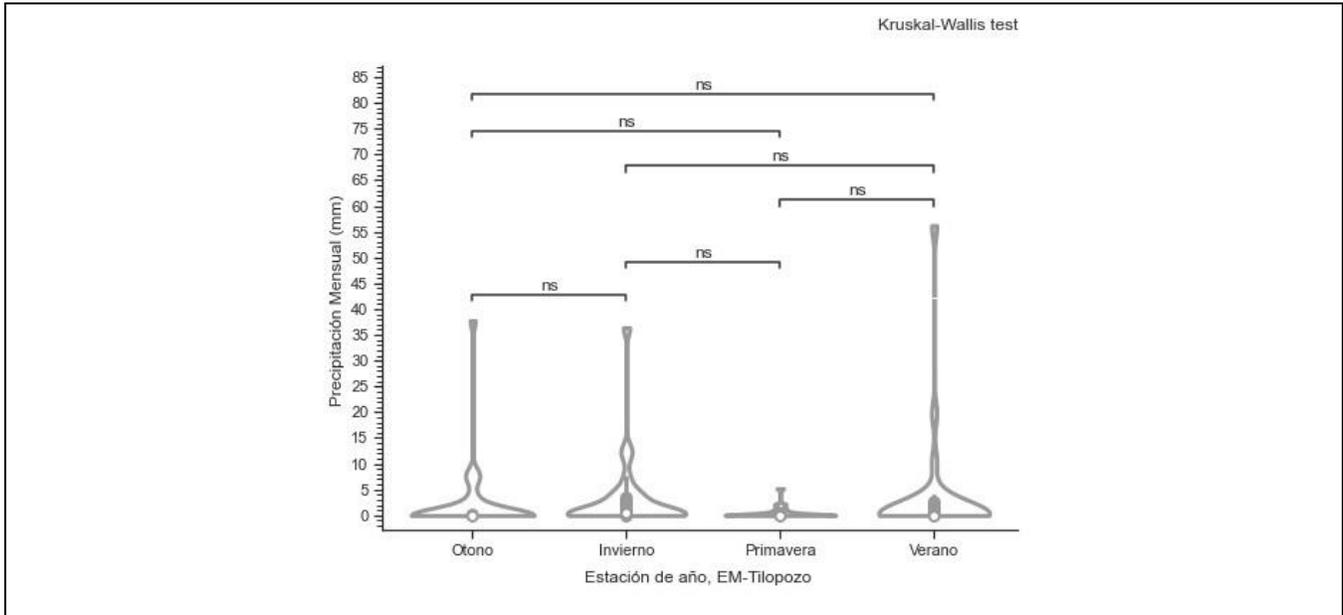


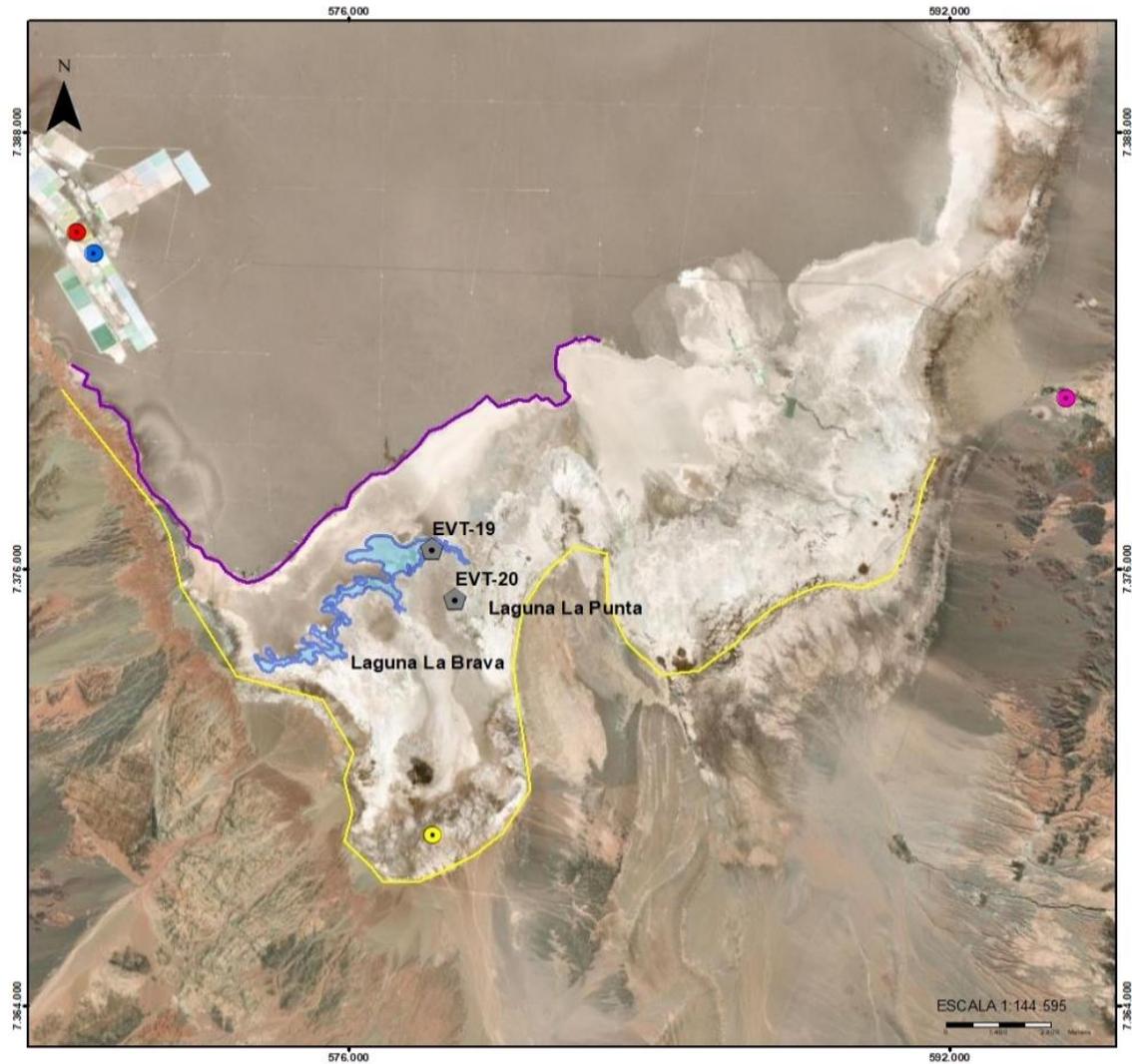
Figura 6-12 Boxplot tipo violín de precipitaciones (mm/mes) según estacionalidad para las estaciones meteorológicas: EM-SCL & EM-Rockwood, EM-Tilopozo y EM-Peine. Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1.3. Evapotranspiración

Los registros de evapotranspiración se presentan como series temporales (Figura 6-13 y

Figura 6-14). Éstos corresponden a mediciones realizadas en terreno a partir de domos, donde se mide la evapotranspiración durante un día cada tres meses. Los puntos de medición disponibles corresponden a EVT-19, localizado en el borde de Laguna La Punta, y el punto EVT-20 que se localiza hacia el sur de las lagunas

La Punta y La Brava (



ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y MONITOREO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN	
SIMBOLOGÍA	
<b>Estaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Monitoreo Evapotranspiración</li> <li>■ Lagunas</li> <li>■ Núcleo del Salar</li> <li>■ Zona marginal</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● EM-Rockwood</li> <li>● EM-SCL</li> <li>● EM-Tilopozo</li> <li>● EM-Peine</li> </ul>	
ELABORADO POR AQUIST Y AMAKAIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE	

**DIAGNOSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.**

**DATOS CARTOGRAFICOS**  
 PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR  
**DATOS GEODÉSICOS**  
 DATUM: WGS 1984

FECHA: 23-09-2020



Figura 6-3). Ambos puntos de monitoreo pertenecen a la empresa Albemarle.

Tabla 6-14. Descripción estadística de evapotranspiración en puntos de monitoreo EVT-19 y EVT-20, período 2013 – 2019.

Parámetro	EVT-19 (mm/día)	EVT-20 (mm/día)
Promedio	3,884	0,623
SD	2,470	0,314
Delta (máx-mín)	9,676	1,334
Percentil 10	1,680	0,310
N observaciones	20	26

Fuente: Elaboración propia

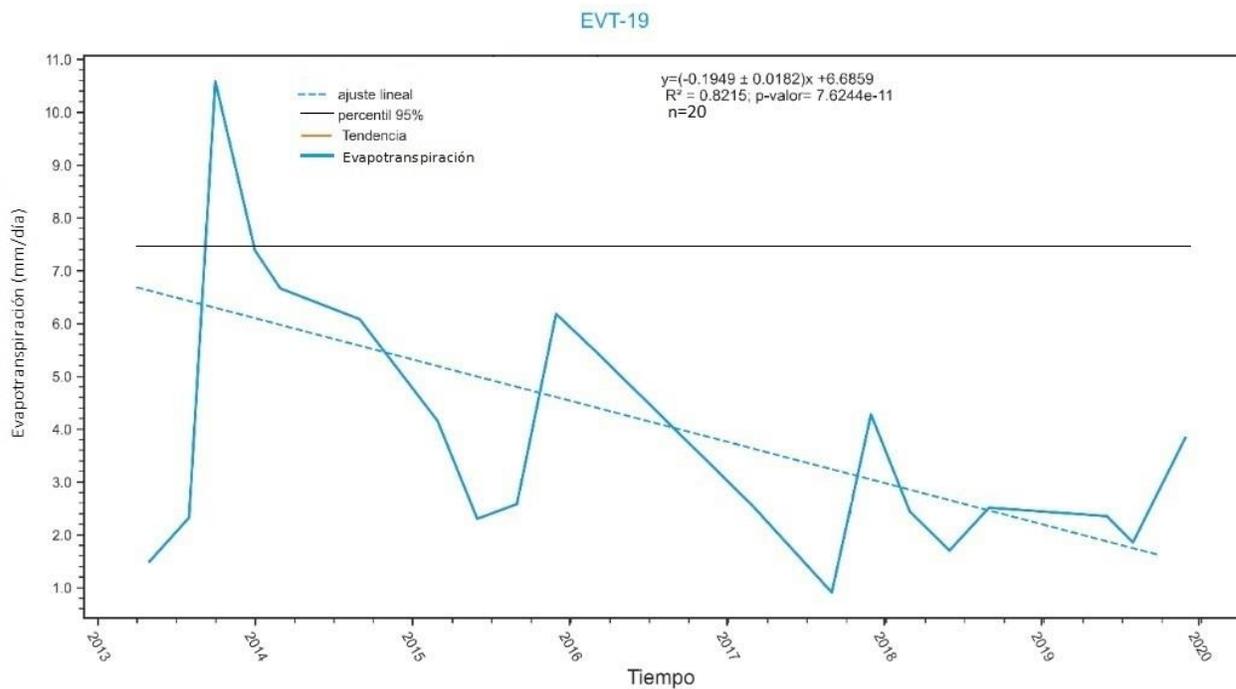


Figura 6-13 Evapotranspiración en punto de monitoreo EVT-19, 2013-2019. Fuente: Elaboración propia.

Es posible observar (Figura 6-13) que en el año 2013 existe un máximo de evapotranspiración. A partir del análisis de series de tiempo se distingue que existe una disminución significativa de los valores de evapotranspiración durante el tiempo en el que se tiene registro ( $p$ -valor  $< 0,001$ ;  $r^2 = 0,82$ ;  $m = -0,19$ ).

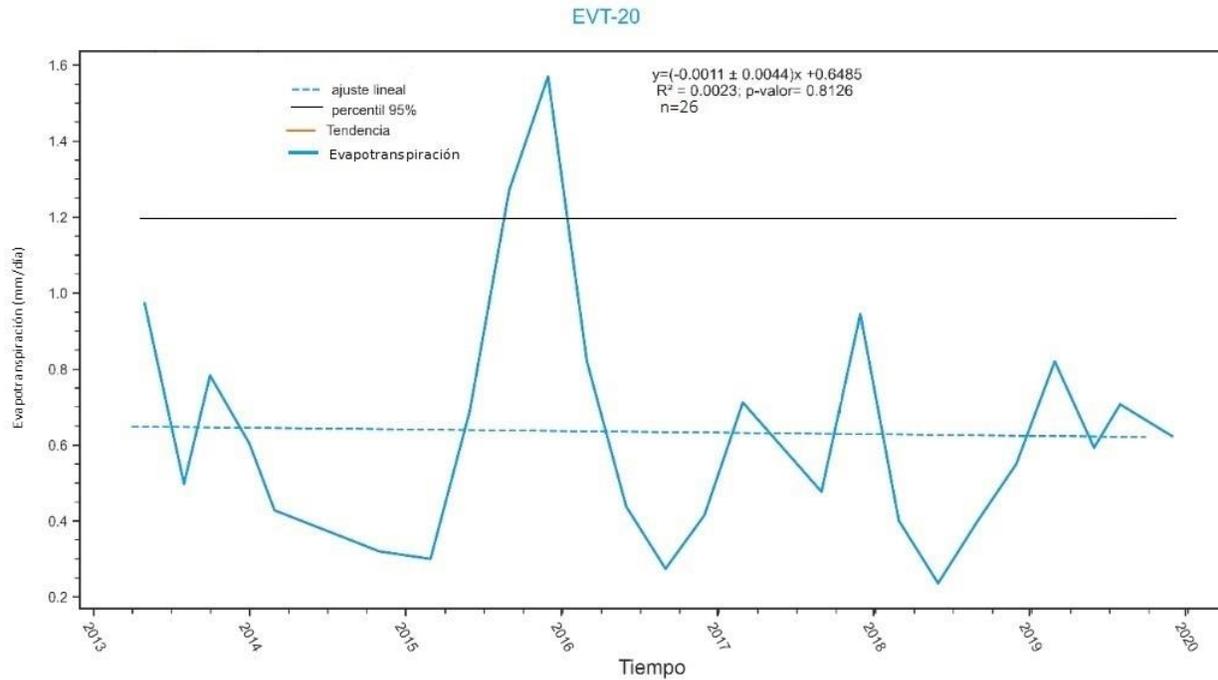


Figura 6-14 Evapotranspiración en punto de monitoreo EVT-20, 2013-2019.

Fuente: Elaboración propia.

La

Figura 6-14 presenta los valores de evapotranspiración medidos en EVT-20. Se observa que el mayor aumento se registra durante diciembre de 2015 (1.57 mm/día), mientras que el valor mínimo se registra en junio de 2018 (0.236 mm/día).

El ajuste lineal del conjunto de datos de EVT-20 no es significativo, por lo que no es posible determinar si ha existido un aumento o disminución de los valores de evapotranspiración para el período estudiado (

Figura 6-14; p-valor > 0,05;  $r^2 = 0,0023$ ;  $m = -0,001$ ).

El valor promedio de evapotranspiración registrado por EVT-19 es 3.88 mm/día mientras que en EVT-20 es de 0.62 mm/día, donde la desviación estándar es de 2.469 mm/día y 0.314 mm/día, respectivamente. Esto indica que los valores en EVT-19 son mayores, más dispersos y fluctúan en un rango de valores notablemente más amplio que los registrados en EVT-20 (Tabla 6-14).

Con respecto a los valores mínimos de evapotranspiración registrados en ambas estaciones, y considerando los valores bajo el percentil 10, se tiene que para la estación EVT-19 los valores bajo el percentil 10 se registran durante septiembre de 2017 y mayo de 2013, con valores inferiores a 1,68 mm/día. Por otro lado, en la estación

EVT-20 los valores bajo el percentil 10 se registran durante marzo de 2015, septiembre de 2016, junio y julio de 2018, con datos inferiores a 0,31 mm/día (Tabla 6-14).

Finalmente, se aplica una prueba estadística para los conjuntos de valores de evapotranspiración registrados en las estaciones EVT-19 y EVT-20, obteniendo diferencia significativa entre ambas estaciones para el período 2013 a 2019 (MWtest, p-valor < 0,001).

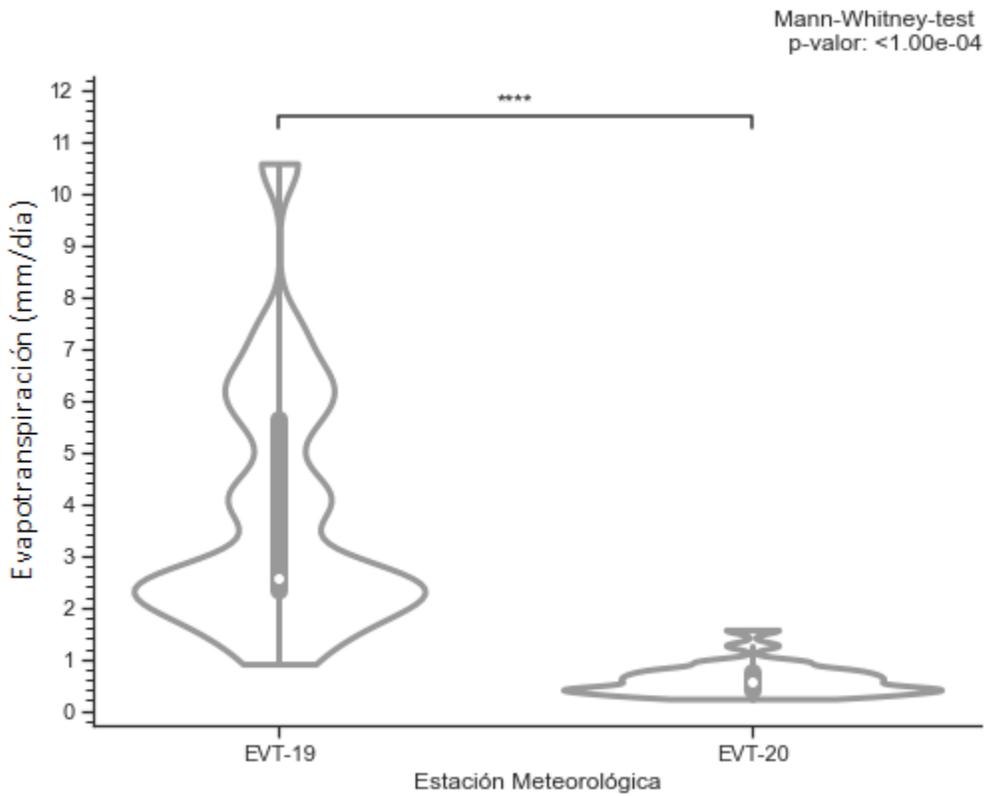


Figura 6-15 Boxplot, monitoreo de evapotranspiración en EVT-19 y EVT-20, 2013-2019

Fuente: Elaboración propia

La

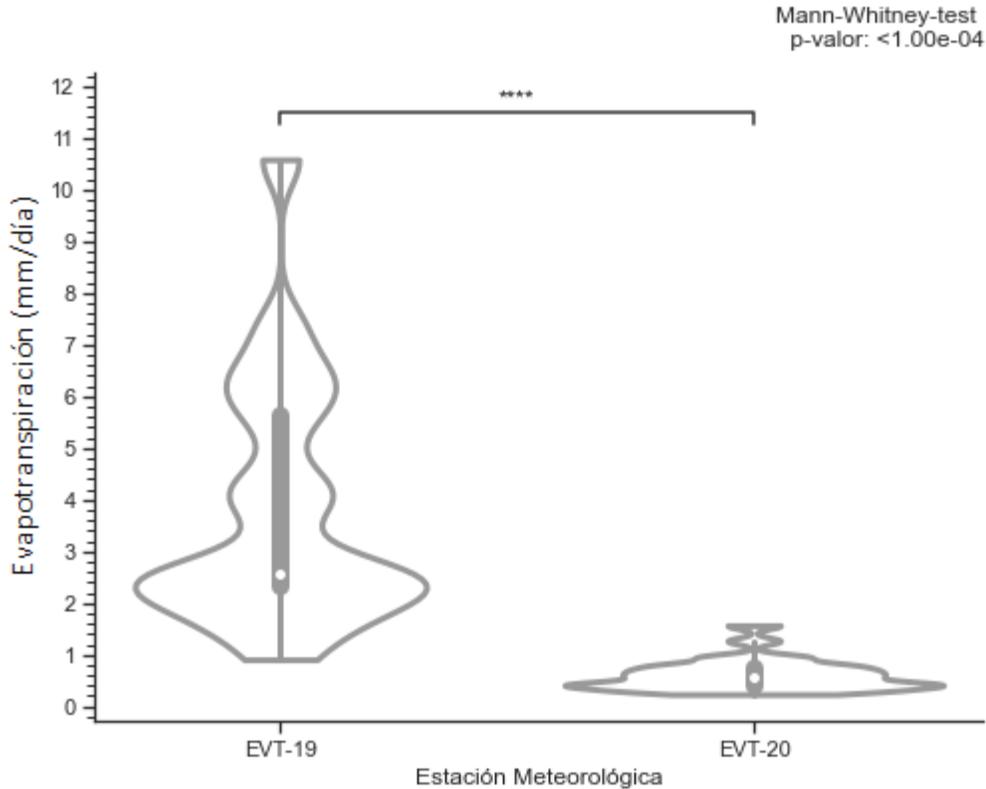


Figura 6-15 presenta un boxplot tipo violín para las estaciones EVT-19 y EVT-20 donde se exponen los datos de evapotranspiración de ambos puntos de monitoreo. Para el punto de monitoreo EVT-19, la mayor cantidad de datos se distribuye en los valores 2 y 3 mm/día, mientras que para EVT-20 la mayor distribución de los datos se encuentra entre los valores 0.4 y 0.6 mm/día.

#### 6.2.1.4. Superficie de lagunas y de dilución salina

En este capítulo se presentan y analizan los registros de superficie lagunar estimada para La Punta y La Brava, y también los registros de la superficie de agua estimada en la zona de dilución salina desde 1985 a 2019. Esta última se localiza al noroeste de las lagunas y en el borde sur del núcleo del Salar (Figura 4-1) El área de estudio (Figura 4-1), comprende las lagunas La Punta y La Brava, localizadas en la zona marginal sur del Salar de Atacama (576.554 E/ 737.555.595 S, Datum WGS-84), Región de Antofagasta.

Tabla 4-1 Vértices de polígono área indirecta

Vértices	Coordenadas UTM (Datum WGS84)	
	Este (m)	Norte (m)
1	573.516,216	7.377.604,584
2	579.389,978	7.377.604,584
3	579.389,978	7.373.085,491
4	573.505,633	7.373.096,075

Fuente: Elaboración propia

). Se trabajó con una base de datos propia, generada a partir del análisis de imágenes satelitales (ver metodología de Imágenes satelitales, subcapítulo 5.2.3) a una resolución de 4 temporadas por año, y con la base de datos de Minera Escondida, de resolución temporal de dos estaciones por año, invierno y verano, desde 2002 a 2018, datos obtenidos a partir del Anexo G, del Plan de Alerta Temprana 2018 de Minera Escondida.

Se debe señalar que no se consideró la base de datos de Albemarle, debido a vacíos importantes de información para todas las temporadas, ya que en el Anexo C “Superficie cubierta por lagunas (1985-2019)”, del Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico 2019, RCA 21/2016, no se especifica si las áreas corresponden a superficies lagunares o a superficies lagunares más zona de dilución salina. Esta información tampoco se encuentra en los planes de seguimiento ambiental.

Por otro lado, dado que el sistema lagunar es sensible a la estacionalidad y con la finalidad de mantener la objetividad de los resultados, los datos se analizaron por temporadas, presentándose las series temporales y descripciones estadísticas de esta forma.

Para la base de datos generada se diferencié entre el área lagunar superficial y profunda. La superficie lagunar total se entiende como la suma de ambas (superficial y profunda). Para esto, se toma en cuenta la altura de la columna de agua desde la base de la laguna hasta su superficie. Los análisis estadísticos se presentan en Tabla 6-15 y Tabla 6-16.

Se presenta para esta variable el valor de cambio relativo, que es el valor del ajuste lineal en tiempo final menos el valor del ajuste lineal en el tiempo inicial. Como se detalla más adelante, todos los cambios relativos para el registro de superficies resultaron ser de disminución, por lo que así se presenta en Tabla 6-16. A partir del cambio relativo es posible calcular el cambio relativo porcentual, que es el cambio relativo dividido por valor del ajuste lineal en tiempo inicial, luego multiplicado por 100. Ambos se calcularon solo para los conjuntos con un ajuste lineal considerable y una pendiente significativamente distinta a cero ( $r^2 > 0,10$  y  $p\text{-valor} < 0,05$ ).

Tabla 6-15. Síntesis de descripción estadística de superficies lagunares y de dilución salina estimadas.

Base de datos	Superficie		Temporada	Promedio (ha)	SD (ha)	Mínimo (ha)	Máximo (ha)	Percentil 10 (ha)	Percentil 90 (ha)	N observaciones
Generada 1985-2019	Lagunas	Total	Verano	38,48	11,94	18,54	69,12	23,87	53,30	33
			Invierno	82,82	33,68	37,89	151,29	39,75	122,15	34
			Otoño	51,02	18,96	24,66	104,49	30,26	72,56	33
			Primavera	39,97	13,13	19,26	68,76	23,05	57,75	34
		Profunda	Verano	23,31	7,30	8,64	45,63	16,13	30,46	33
			Invierno	56,44	24,33	22,59	100,8	24,68	85,72	34
			Otoño	31,42	14,57	6,57	86,4	18,83	44,14	33
			Primavera	25,26	8,10	10,62	45,09	14,47	33,23	34
	Dilución Salina	Agua	Verano	12,04	15,45	0,00	51,30	1,71	31,14	29
			Invierno	13,18	15,66	0,00	44,10	0,53	34,97	33
			Otoño	14,81	17,39	0,00	57,24	0,52	39,34	32
			Primavera	12,53	16,23	0,00	56,97	0,0	35,80	34
Minera Escondida 2002-2018	Lagunas más Dilución Salina	Profunda	Verano	38,53	13,62	17	58	S/I	S/I	15
			Invierno	52,6	28,82	7	112	S/I	S/I	15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-16. Disminución total y cambio porcentual de superficies lagunares estimadas desde 1985 a 2019

Base de datos	Superficie		Temporada	Disminución total (ha)	Cambio relativo %
Generada 1985-2019	Lagunas	Total	Verano	-27,23	-52,27%
			Invierno	-102,56	-76,48%
			Primavera	-28,89	-53,09%
			Otoño	-43,17	-59,46%
		Profunda	Verano	-16,18	-51,53%
			Invierno	-72,64	-78,30%
			Primavera	-18,06	-52,68%
			Otoño	-33,25	-69,20%

Fuente: Elaboración propia

### I. Base de datos generada

Los registros de superficies lagunares totales y profundas de La Punta y La Brava y de superficies de agua estimada en zona de dilución salina (Borde sur del núcleo del Salar) se presentan en gráficos de barras, los que muestran una observación anual para cada temporada desde 1985 a 2019.

Se clasificó como superficie lagunar superficial al área que tiene una columna de agua estimada desde 0,2 m a 0,3 m, desde la base de la laguna hasta su superficie. En cambio, la superficie lagunar profunda se refiere al área de profundidad mayor a 0,3 m aproximadamente. La suma de ambas se señala como superficie lagunar total. Se estima que los pixeles de agua de profundidad menor a 0,2 m no fueron reconocidos por el método de clasificación aplicado, así también, la resolución espacial media de 30 x 30 metros es una limitante para detectar áreas de agua de baja profundidad.

Se debe mencionar que el porcentaje de error estimado al aplicar el método de validación (ver metodología de imágenes satelitales) para las superficies areales obtenidas a través de las imágenes Landsat en las fechas 11/08/2019 y 20/05/2018 se subestimó en un -40%. Este error se asocia a las limitaciones de resolución espacial y a la falta de calibración en terreno.

Para estimar el error con mayor precisión, se necesita realizar una validación en campo, tomando puntos de control de la profundidad de la columna de agua, como también comprobar con imágenes satelitales de mayor resolución que correspondan a las fechas de las imágenes Landsat utilizadas.

#### **a. Superficie lagunar total**

Los valores estimados de superficie lagunar total durante todas las temporadas se ajustan estrechamente a una tendencia de disminución significativa, desde 1985 a 2019 (invierno p-valor < 0,001 y  $r^2= 0,844$ ; verano p-valor < 0,001 y  $r^2 =0,475$ ; primavera p-valor < 0,001 y  $r^2=0,441$ ; otoño p-valor < 0,001 y  $r^2=0,473$ ;

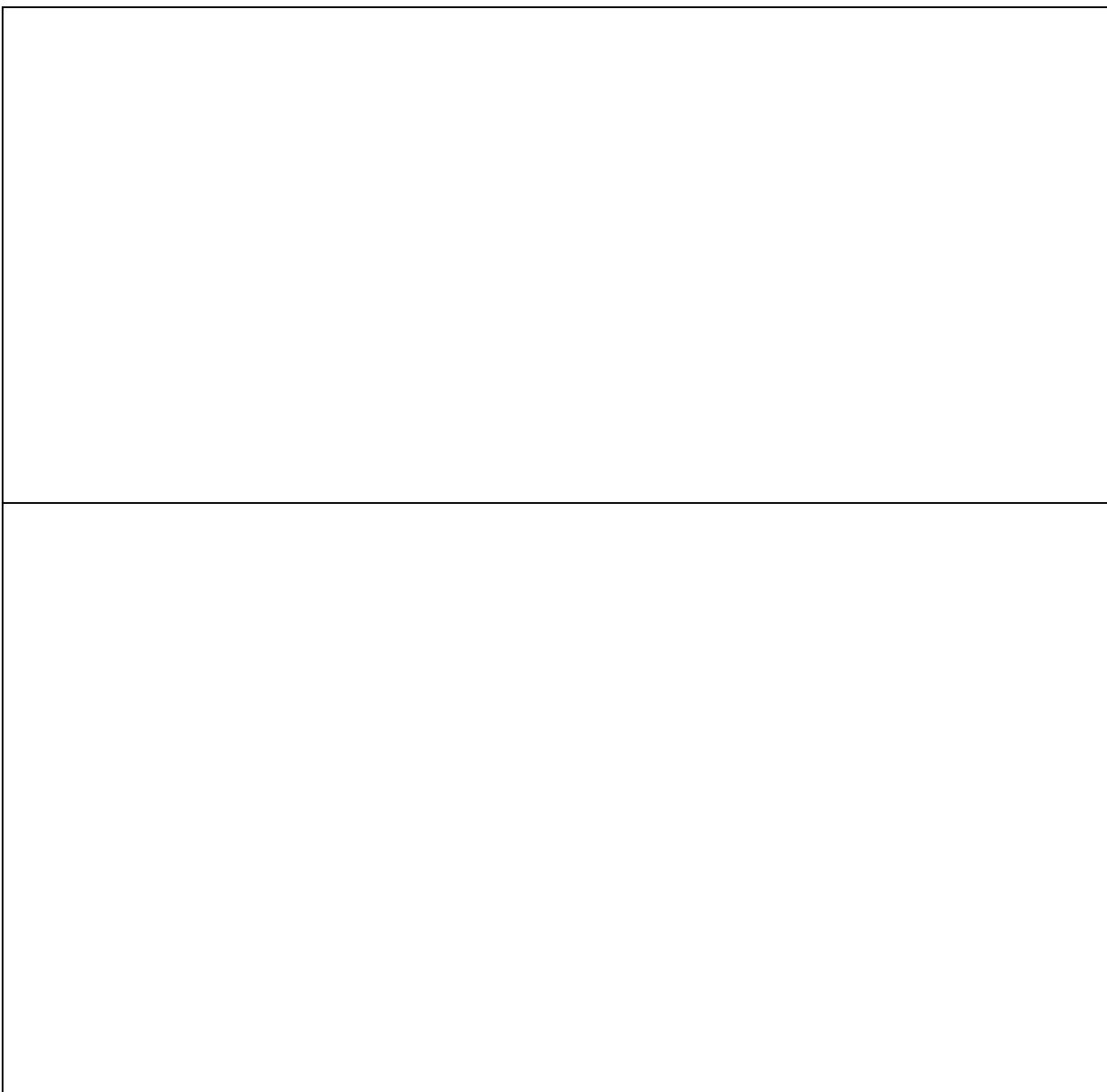
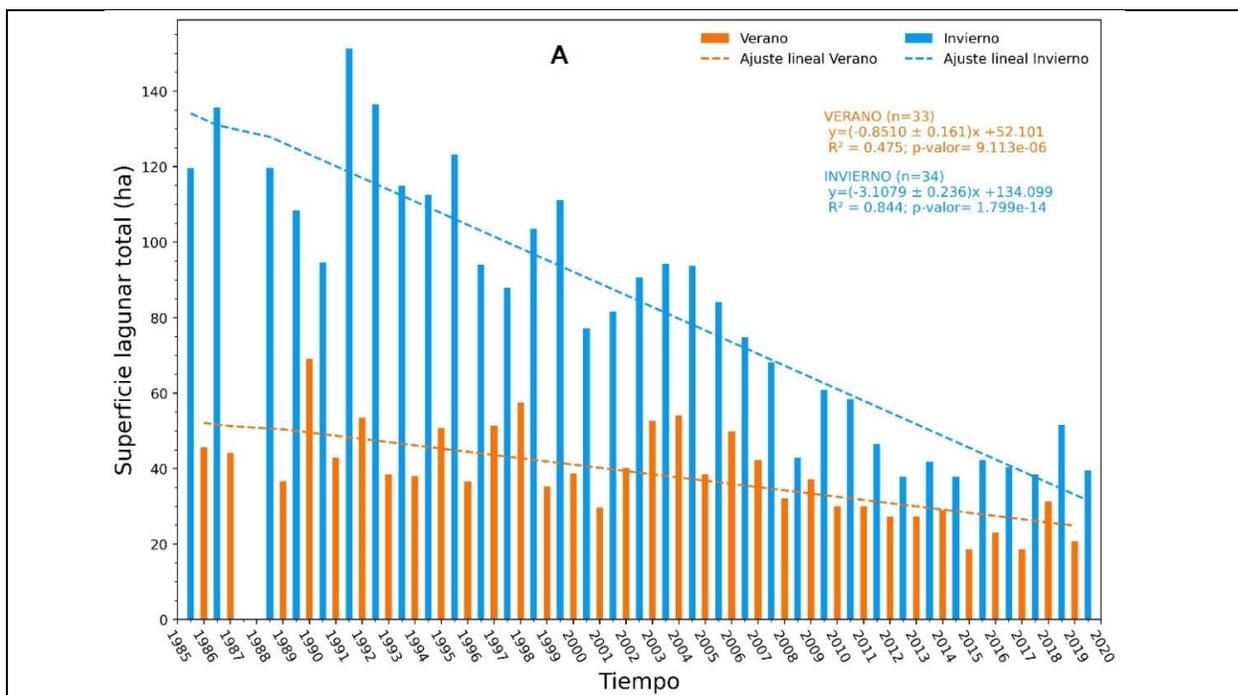


Figura 6-16 A y B). Los resultados, en orden de mayor a menor, para la tasa de cambio otorgada por la pendiente del ajuste lineal son los siguientes: invierno=-3,108 ha/año; otoño=-1,349 ha/año; primavera=-0,876 ha/año; y verano=-0,851 ha/año.



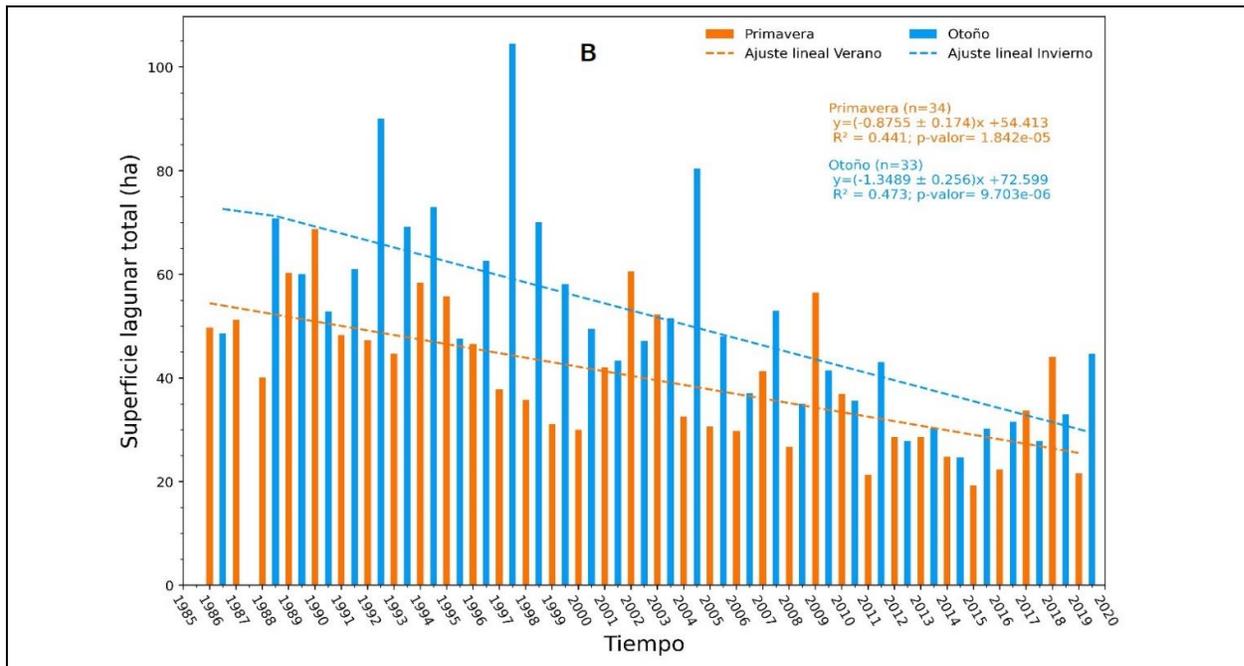


Figura 6-16 Superficie lagunar total: (A) verano e invierno, (B) otoño y primavera, 1985- 2019.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-16 A y B se aprecia que la superficie lagunar para todas las estaciones del año muestra un descenso con fluctuaciones interanuales, donde el mayor contraste se produce entre verano e invierno. Este contraste, no obstante, ha disminuido a lo largo del registro a medida que el área superficial disminuye, y así los valores registrados en la temporada estival e invernal tienden a converger entre sí. A la vez, el registro obtenido durante primavera y otoño muestran valores intermedios con respecto al registro de verano e invierno. Las fluctuaciones interanuales para el registro de otoño y primavera no presentan una estrecha correspondencia con el registro de verano y tampoco al de invierno, ya que se aprecian aumentos notables sin correlatos análogos. Cabe considerar la incertidumbre debido al tamaño de píxel de la imagen satelital, de modo que se dificulta estimar con precisión la superficie lagunar total, lo cual podría estar afectando estos resultados.

La desviación estándar de las superficies lagunares para las estaciones del año en orden mayor a menor es: invierno (33,68 ha), otoño (18,96 ha), primavera (13,13 ha) y verano (11,94 ha; Tabla 6-15). Esto sugiere que la estación invernal es la que presenta las fluctuaciones de mayor magnitud, equivaliendo casi el doble a la calculada para otoño, y tres veces mayor que la calculada para verano. Similarmente, el cambio relativo para

las cuatro estaciones del año se ordena de la misma forma que la dispersión, siendo todas de disminución significativa: Invierno (-102,56 ha), otoño (-43,17 ha), primavera (-28,89 ha) y verano (-27,23 ha; Tabla 6-16). Respecto a los percentiles, las superficies lagunares bajo el percentil 10 se registran desde el año 2012 a 2019, para todas las temporadas, a excepción de primavera 2001. En cambio, las superficies lagunares altas, sobre el percentil 90, se registran desde 1986 a 2009, en todas las temporadas (

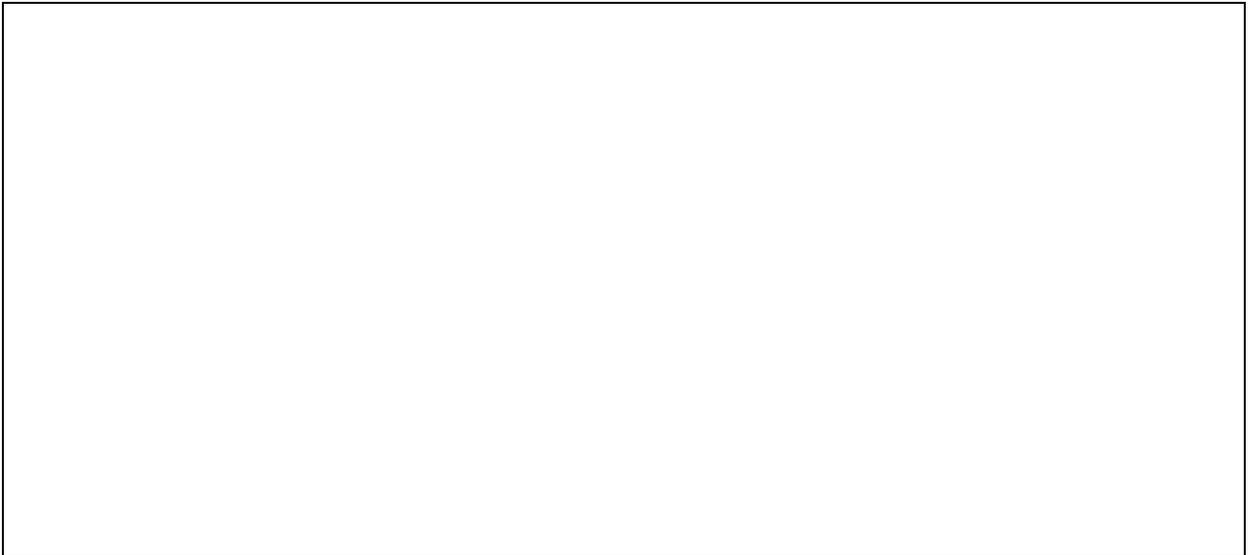




Figura 6-16 A).

Se realizó un análisis de varianza, separando las observaciones según la estación del año, para precisar si hay diferencias significativas entre las estaciones del año y se encontró que la superficie lagunar total es mayor en invierno, que es significativamente distinto a otoño, primavera y verano (KWtest p-valor < 0,001; Dtest p-valor < 0,001 con primavera y también con verano; p-valor < 0,05 con otoño; Tabla 6-15). Otoño es la estación del año siguiente con mayores valores, siendo significativamente distinto a verano, pero no a primavera (Dtest p-valor < 0,05 con verano; p-valor > 0,05 con primavera). Finalmente, no hay evidencia de una diferencia significativa entre verano y primavera (Dtest p-valor > 0,05).

A continuación, se presenta una descripción detallada para cada temporada.

### **Invierno**

Esta temporada presenta un promedio de 82,82 ha y una desviación estándar de 33,68 ha (Tabla 6-15). A partir de la curva de invierno se observa una reducción progresiva de la superficie lagunar total a lo largo del tiempo (

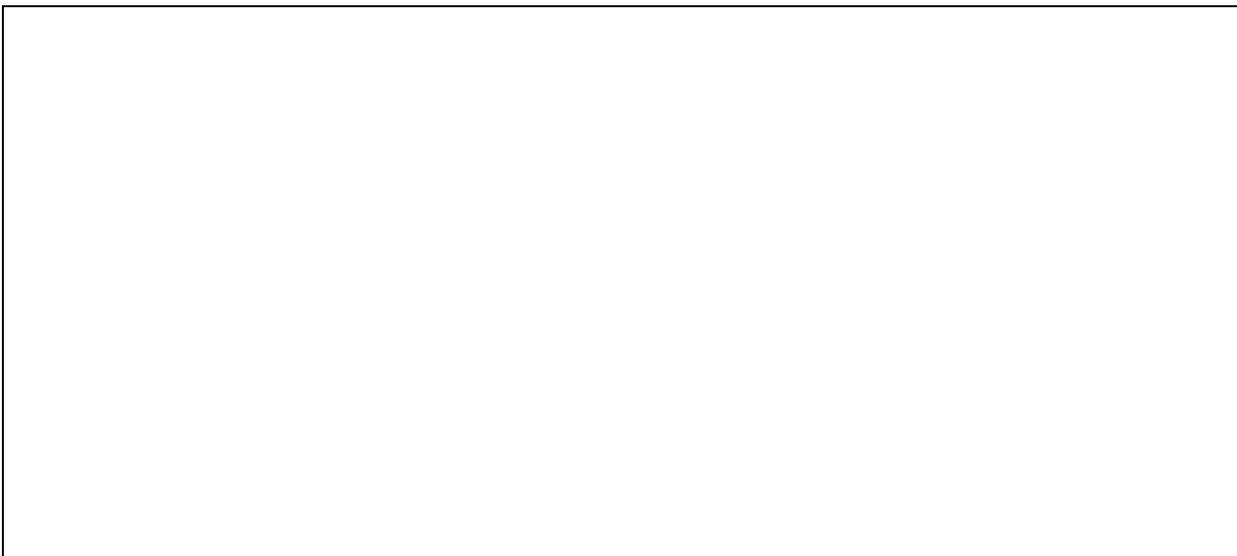




Figura 6-16 A). Concretamente, se aprecia una reducción de 102,56 ha, que equivale a un -76,48% de cambio relativo ( $p$ -valor  $< 0,001$ ;  $r^2= 0,844$ ; Tabla 6-16). Sin perjuicio de lo anterior, los mayores aumentos suceden durante 1986 (135,72 ha), 1991 (151,29 ha), 1992 (136,53 ha), 1995 (123,21 ha) y 1999 (111,24 ha). Las observaciones para la temporada invernal fluctúan entre 87,84 ha y 151,29 ha para el período comprendido entre 1985 y 1999. Posteriormente se distinguen aumentos de menor magnitud durante 2004 (93,69 ha), 2009 (60,84 ha) y 2018 (51,48 ha). El aumento de 2018 coincide con un evento de precipitación de 3,3 mm durante julio, en EM-Rockwood.

Observaciones de superficie lagunar total sobre el percentil 90 (122,15 ha) se registraron entre 1985 y 1995, mientras que las menores, bajo el percentil 10 (39,75 ha), se observan recientemente, desde 2011 a 2019. Además, durante el período 2012 a 2017, los datos se concentran en un rango bajo desde 38 a 42 ha (

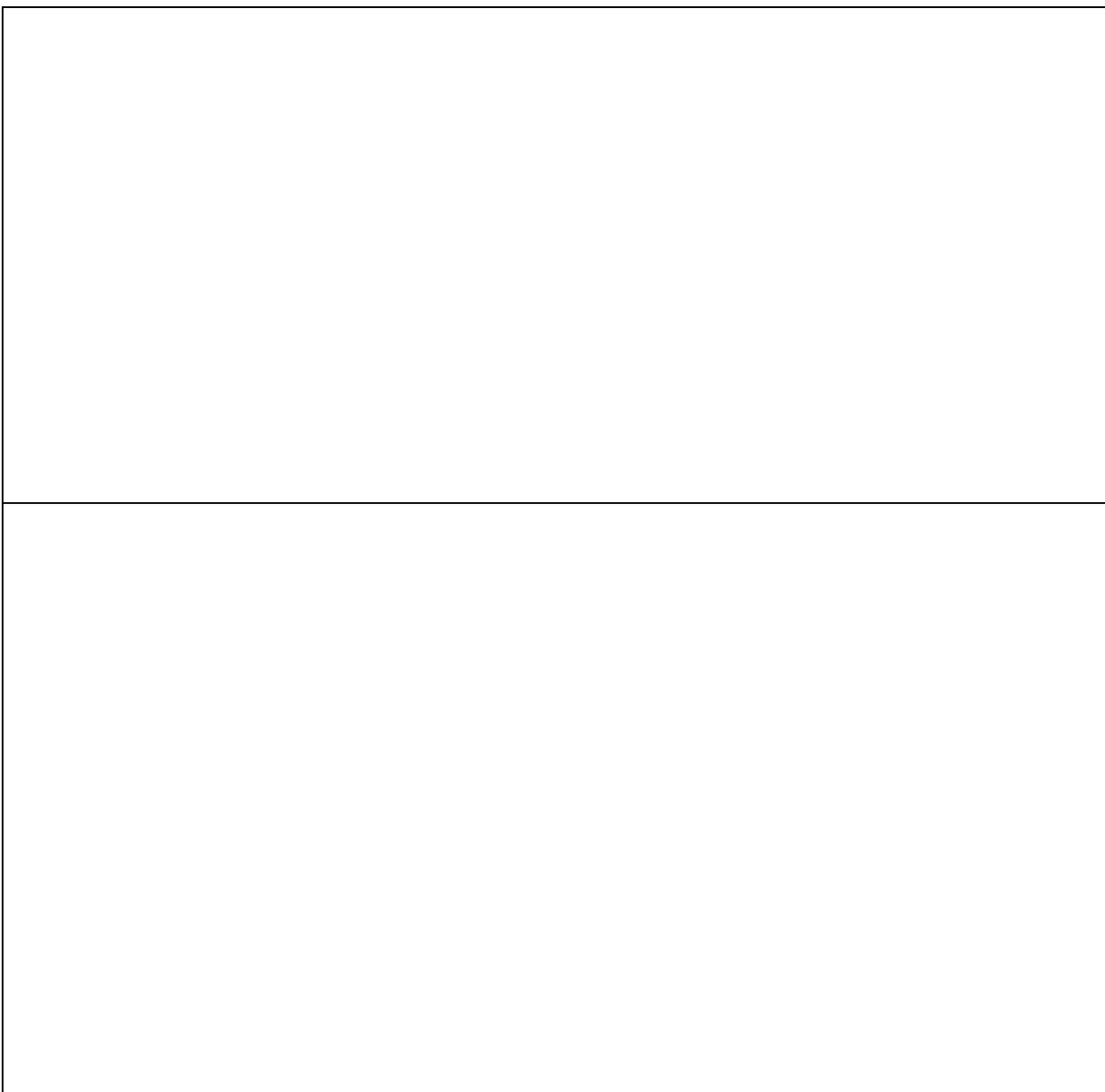


Figura 6-16 A).

### **Verano**

Esta temporada presenta un promedio de 38,48 ha y una desviación estándar de 11,936 ha (Tabla 6-15). La reducción estimada es de 27,23 ha, que equivale a -52,27% de cambio relativo (Tabla 6-16). A partir de la serie temporal se observa que el registro de verano es el más constante de todas las temporadas, cuyos valores fluctúan entre 20,7 y 69,12 ha (

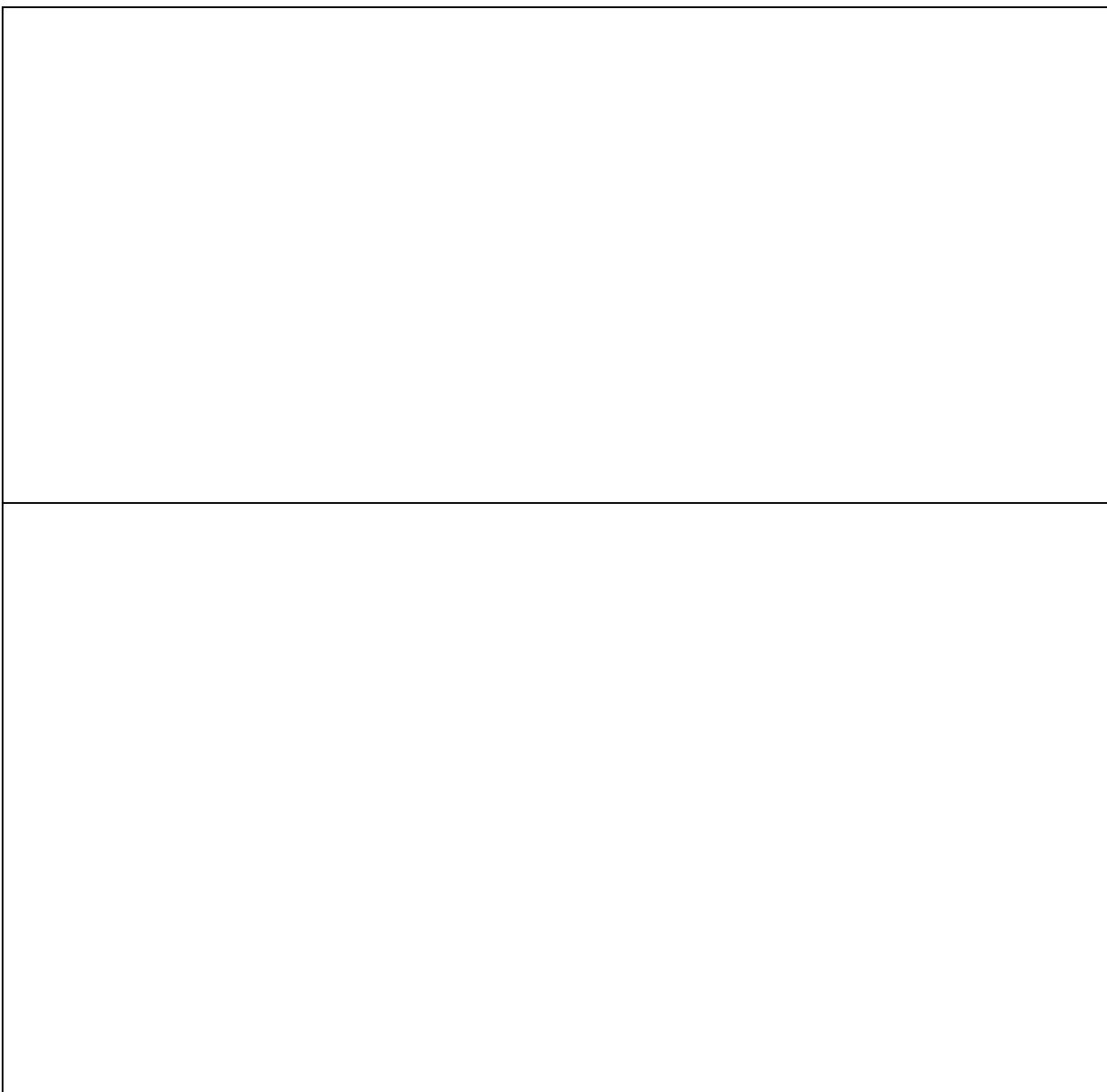
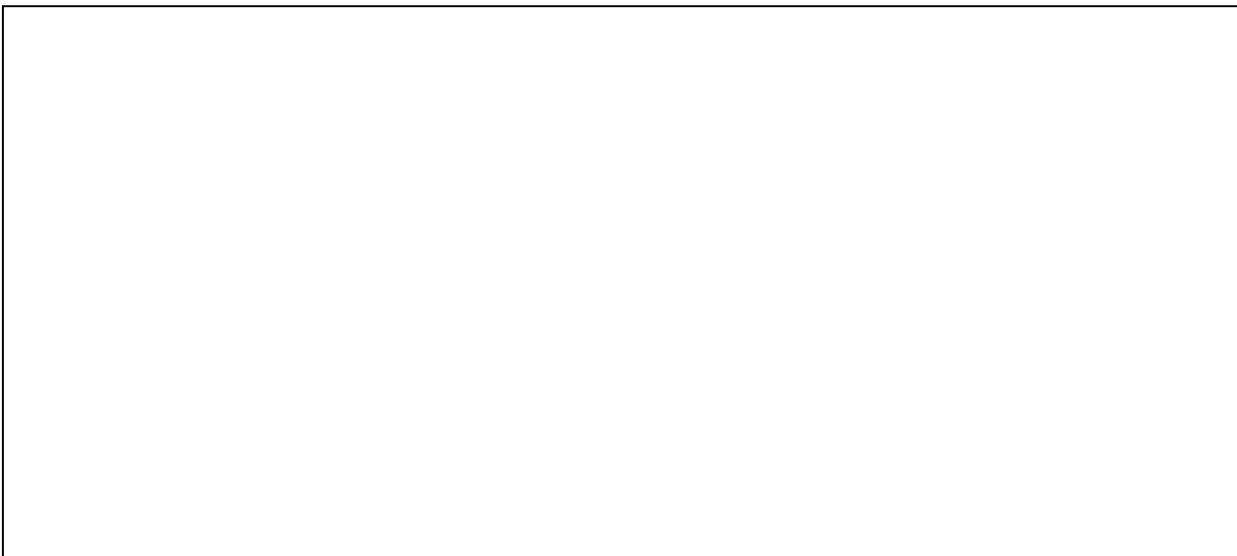


Figura 6-16 A). Entre los años 1985 y 1989, el área de la superficie fluctúa entre 45,63 ha y 36,63 ha. Se observan aumentos durante 1990 (69,12 ha), 1998 (57,42 ha) y desde 2002 a 2004 (40,14 a 54,09 ha);



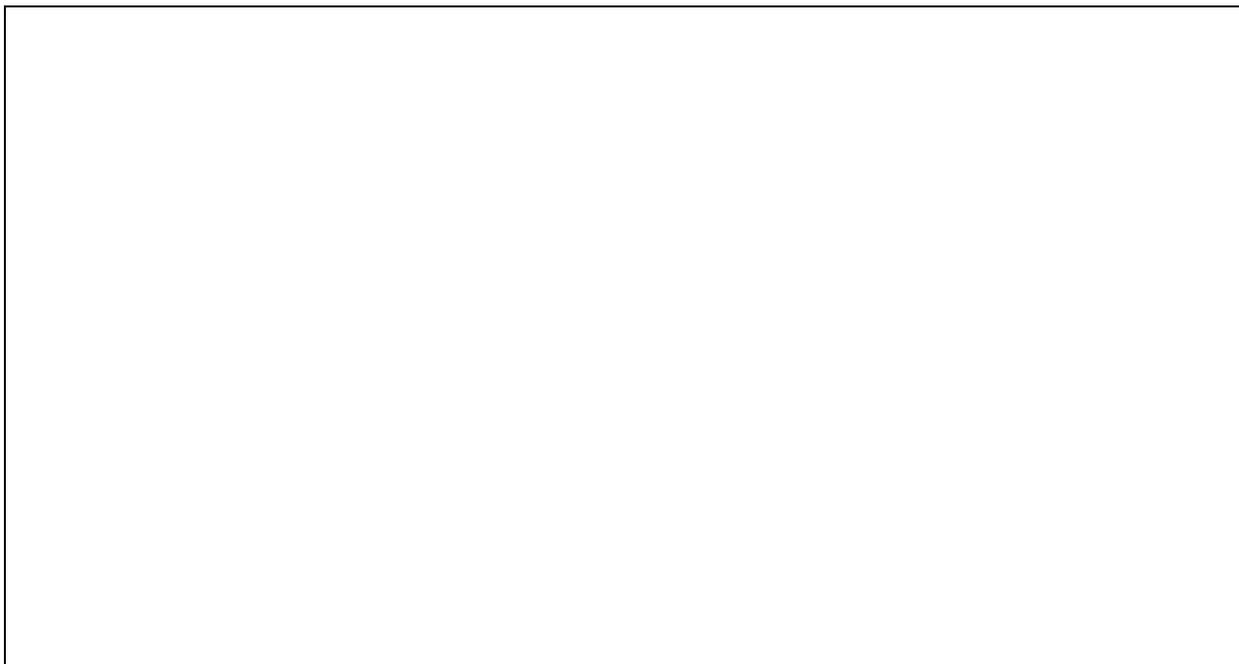


Figura 6-16 A). Estos aumentos coinciden con eventos de precipitación registrados en EM-Peine durante los veranos de 1990 (4,1 mm), 1998 (8 mm), 2002 (69,5 mm), 2003 (40,05 mm) y 2018 (8 mm), y en EM-Rockwood 1998 (4 mm), 2002 (20 mm), 2006 (4 mm; Figura 6-9 y Figura 6-11). Posteriormente, desde 2009 a 2019, el área de superficie se ve reducida, aunque estable fluctuando entre 18,54 ha y 37,08 ha, y sin aumentos notables (

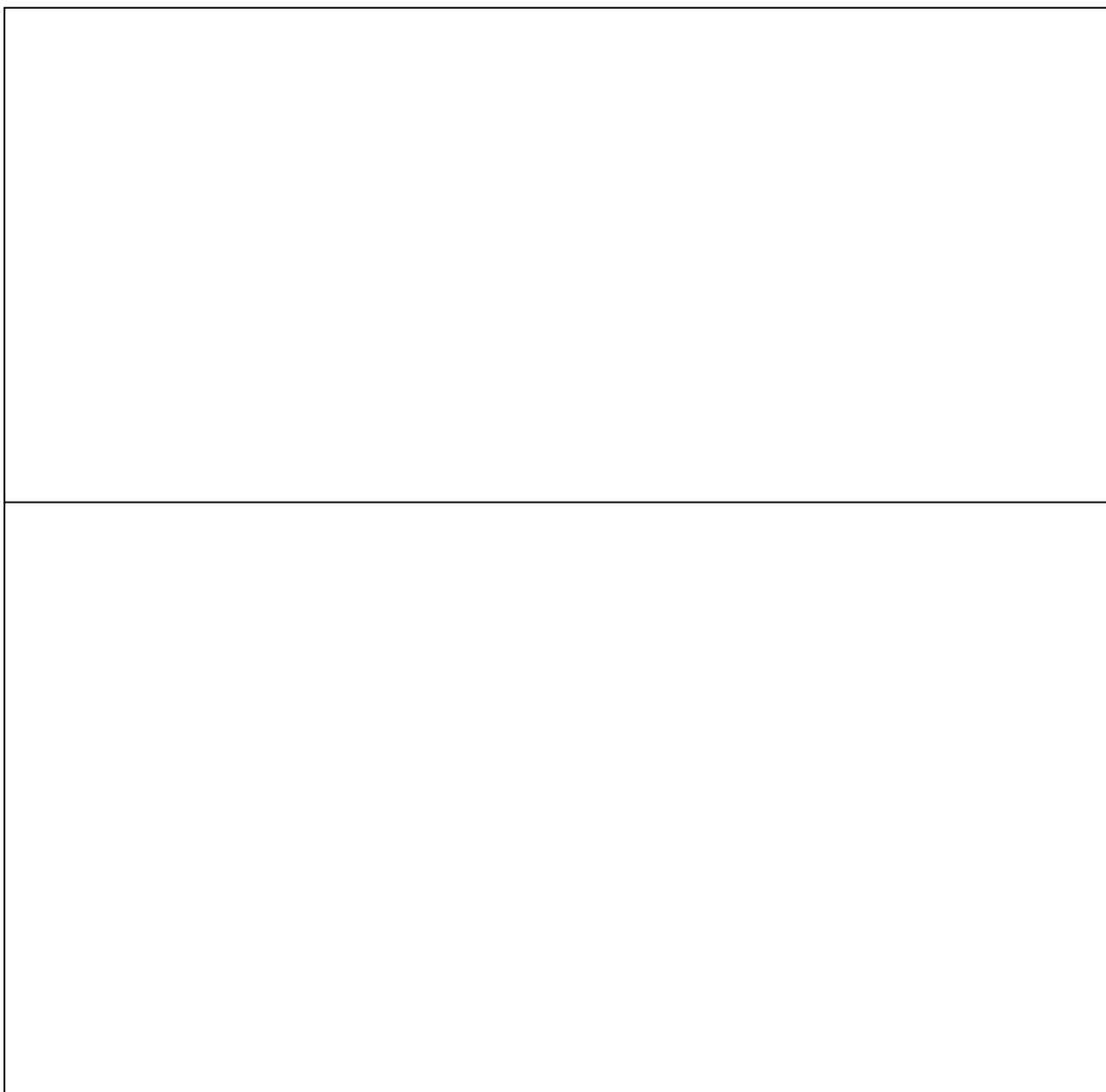


Figura 6-16 A).

Valores de área de superficie sobre el percentil 90 (53,3 ha) se observan entre 1985 y 2004. En cambio, valores bajo el percentil 10 (23,87 ha) se aprecian durante el período más reciente (2015 a 2019). Al comparar el período 1985 – 2008 con el período 2009 – 2019 se observa que en este último existe una disminución en los valores, tanto en la temporada de invierno como en verano.

### Otoño

Esta temporada presenta un promedio de 51,016 ha y una desviación estándar de 18,961 ha. La reducción estimada es de 43,17 ha, que equivale a un cambio relativo porcentual de -59,46% ( $r^2 > 0,1$ ; p-valor  $< 0,001$ ). Se distingue una amplia fluctuación de valores entre 1986 y 2006, estando ubicados los aumentos mayores, sobre el percentil 90, durante 1988 (70,83 ha), 1992 (90 ha), 1997 (104,49 ha) y 2004 (80,46 ha);



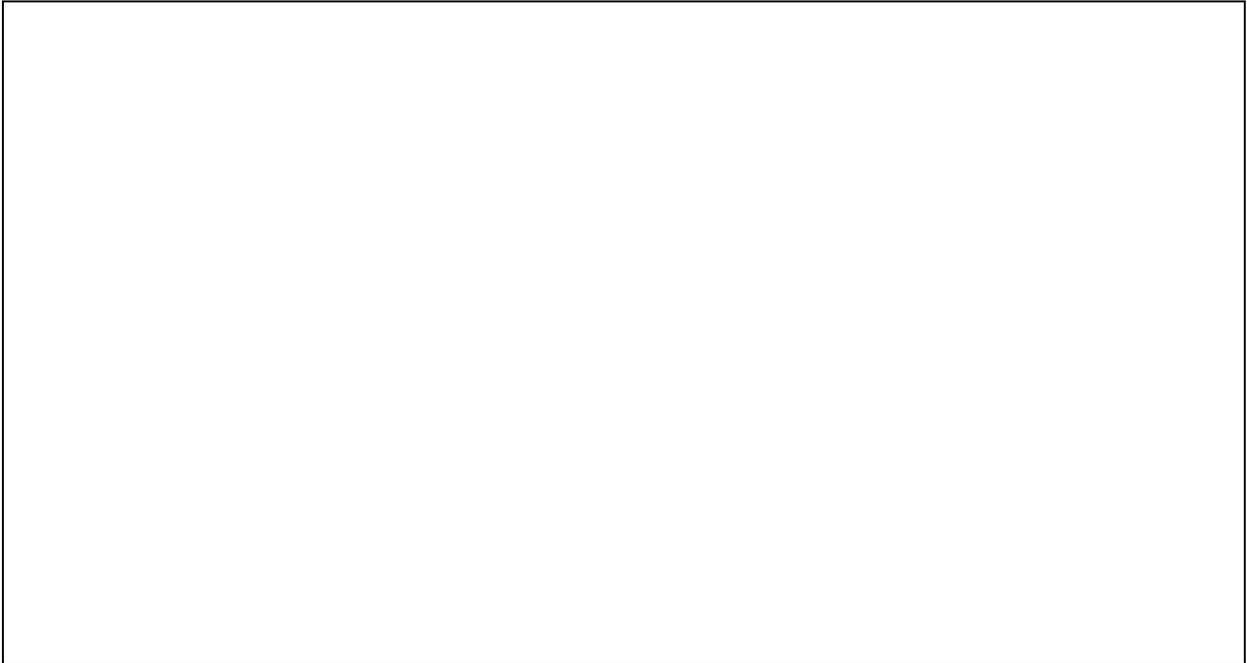


Figura 6-16 B). Se observan coincidencias de aumentos con eventos de precipitación en EM-Peine durante otoño 1992 (10 mm), mayo 1997 (5,5 mm) y abril 2019 (3,5 mm), y de EM-Rockwood durante mayo 1997 (3,3mm; Figura 6-9 y Figura 6-11).

Los valores registrados bajo el percentil 10 están distribuidos durante 2012 (37,89 ha), 2014 (37,89 ha) y 2017 (38,43 ha). Desde 2008 a 2019, las superficies están bajo el promedio y no superan las 45 ha, e incluso desde 2012 a 2018, las observaciones fluctúan en un rango de valores menores y concentrados entre 24,66 ha a 32,94 ha. Sin embargo, durante 2019 se registra un aumento relevante (44,64 ha;

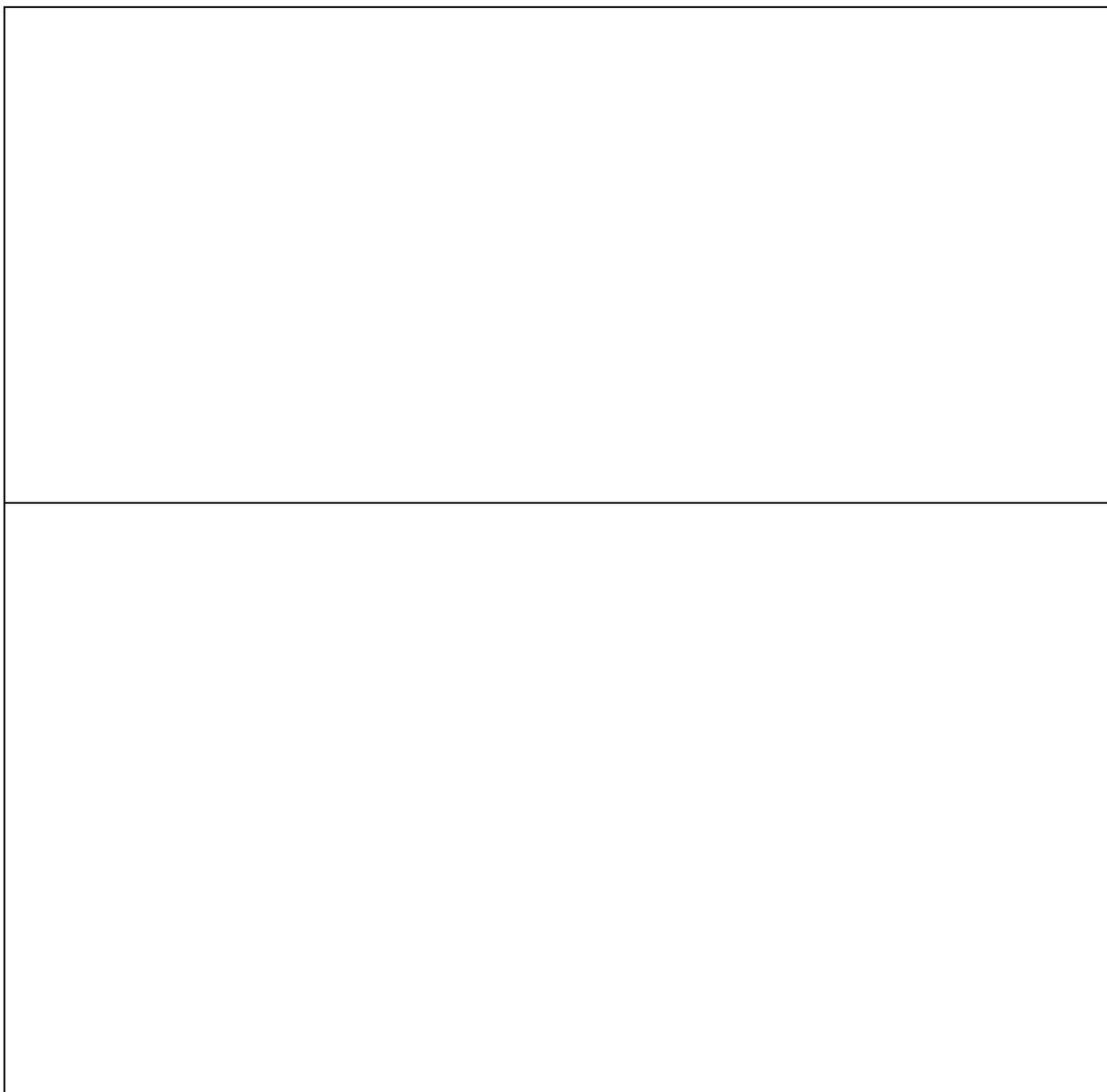


Figura 6-16 B).

**Primavera**

Esta temporada presenta un promedio de 39,97 ha y una desviación estándar de 13,126 ha. Se estima una reducción de 28,89 ha, que equivale a -53,09% de cambio relativo ( $r^2 > 0,10$ ; p-valor < 0,001). La reducción descrita es semejante a la estimada para la estación estival. El rango de valores corresponde al intervalo entre 19,26 ha y 68,76 ha, también similar a lo registrado para verano. Los mayores aumentos se registran durante 1990 (68,76 ha), 1994 (58,32 ha), 2002 (60,57 ha), 2009 (56,43 ha), 2019 (44,01 ha). Descensos notables ocurren durante 1988 (40,05 ha), 1993 (44,64 ha), 2000 (29,97 ha), 2005 (30,69 ha), 2011 (21,33 ha), y 2019 (21,6 ha). El aumento de 1990 coincide con el evento de precipitación de 7 mm durante diciembre en EM-Peine.

Desde 1985 a 1999, los valores de superficie lagunar en primavera fluctúan entre 31,14 a 68,76 ha. Durante el año 2000 se registra un valor bajo de 29,97 ha. En cambio, para el período más reciente entre 2010 y 2019, las observaciones fluctúan entre 21,33 ha y 44,01 ha (

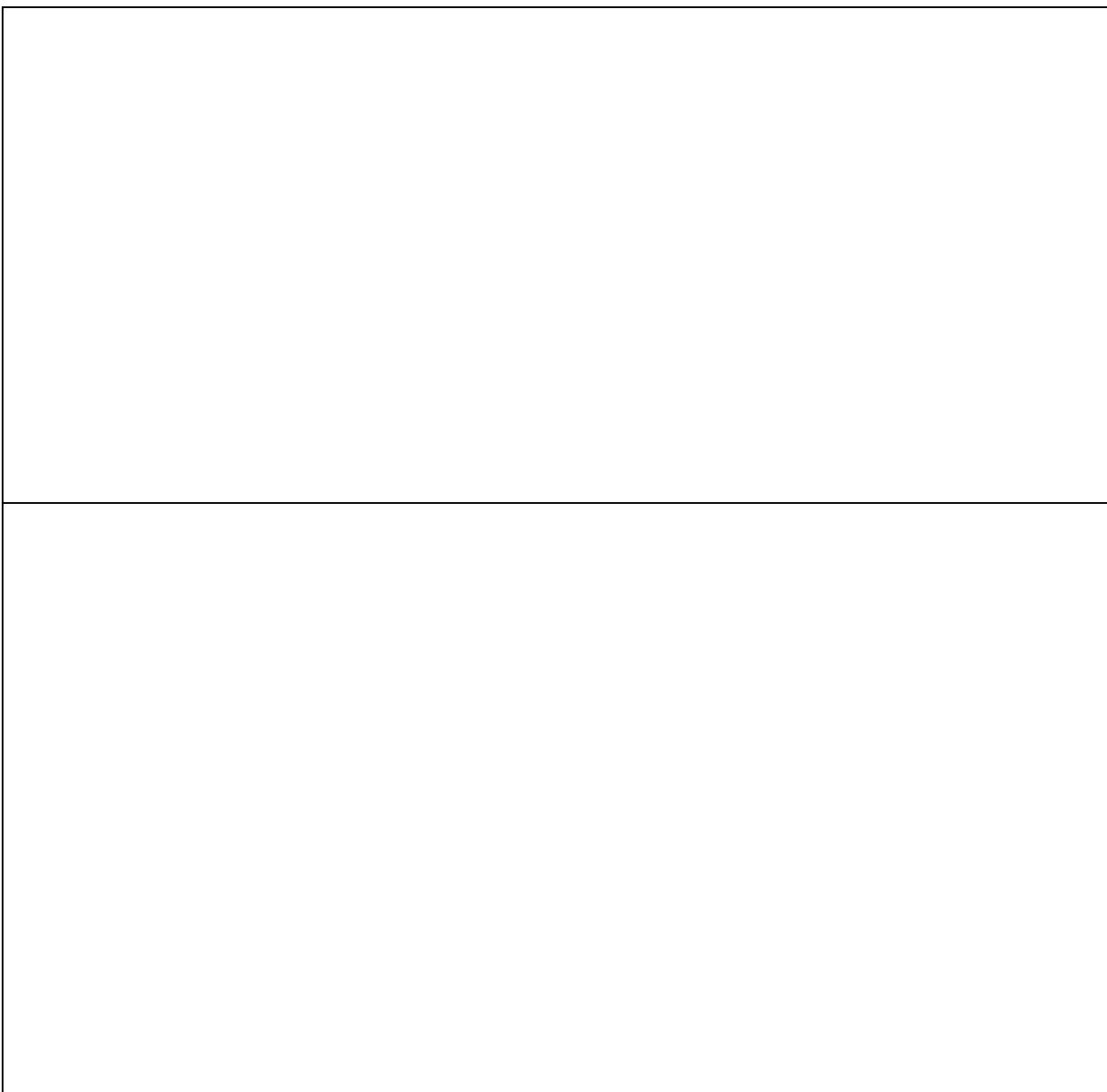
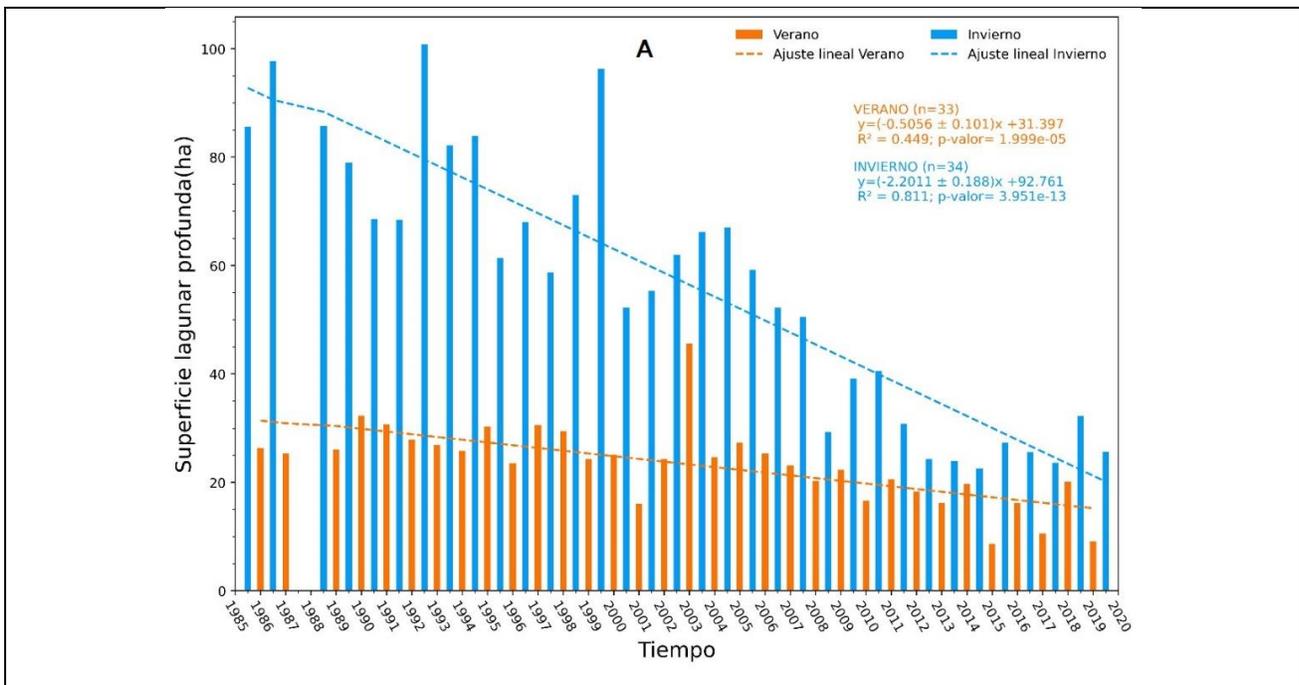


Figura 6-16 B).

Al analizar los percentiles, se observa que las observaciones bajo el percentil 10 (23,05 ha), se registraron durante el período más reciente entre 2011 y 2019, específicamente durante los años 2011, 2014, 2015 y 2019. En cambio, se registran valores sobre el percentil 90 (57,75 ha) durante los años 1990, 1994 y 2002.

**b. Superficie lagunar profunda**

Los valores estimados de superficie lagunar profunda durante todas las temporadas se ajustan a una tendencia de disminución significativa, desde 1985 a 2019, al igual que el registro de valores de superficie lagunar total estimada (invierno p-valor < 0,001 y  $r^2= 0,811$ ; verano p-valor < 0,001 y  $r^2=0,449$ ; primavera, p-valor < 0,001 y  $r^2=0,453$ ; otoño p-valor < 0,001 y  $r^2=0,475$ ; Figura 6-17 A y B). Se distingue que los valores de las pendientes de los ajustes lineales de la superficie lagunar profunda son menores que las pendientes del ajuste lineal de la superficie lagunar total, para todas las temporadas. El orden de mayor a menor de las pendientes según temporada es el mismo, siendo: invierno  $m= -2,201$  ha/año, otoño  $m=-1,039$  ha/año, primavera  $m= -0,547$  ha/año, verano  $m= -0,506$  ha/año.



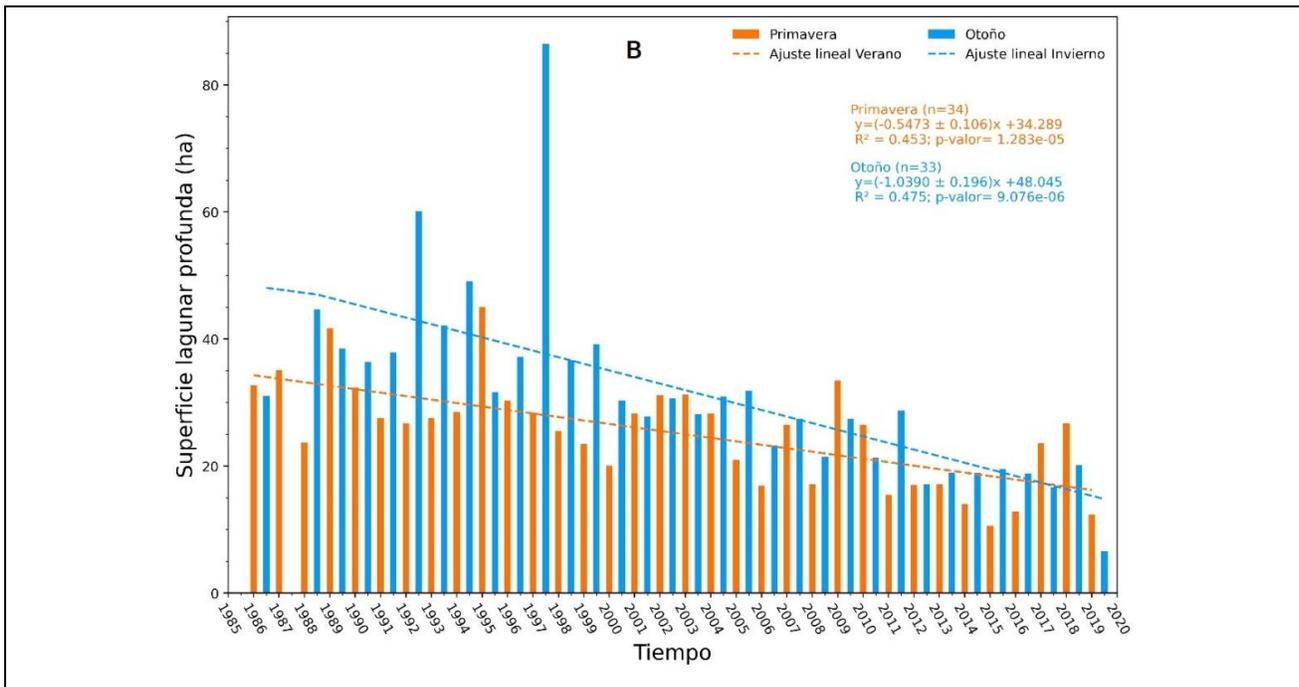


Figura 6-17 Superficie lagunar profunda: (A) verano e invierno, (B) otoño y primavera, 1985- 2019

Fuente: Elaboración propia

En relación a la magnitud de los aumentos presentes en estas series temporales, se observa que son menores a los registrados para las series temporales de la superficie lagunar total. Las temporadas que presentan aumentos, en orden mayor a menor son invierno, otoño y primavera, mientras que la serie temporal de verano presenta menor variabilidad. En este caso los valores de todas las estaciones del año tienden a la convergencia a medida que se reduce el espejo lagunar profundo.

Se realizó un análisis de varianza, separando las observaciones según la estación del año para precisar si hay diferencias significativas entre las estaciones del año. Se encontró que la superficie lagunar profunda es mayor en invierno, que es significativamente distinto a otoño, primavera y verano (KWtest p-valor < 0,001; Dtest p-valor < 0,001 con primavera y también con verano; p-valor < 0,05 con otoño; Tabla 6-15). Otoño es la estación del año siguiente con mayores valores, siendo significativamente distinto a verano, pero no a primavera (Dtest p-valor < 0,05 con verano; p-valor > 0,05 con primavera). Finalmente, no hay evidencia de diferencia significativa entre verano y primavera (Dtest p-valor > 0,05).

Al analizar la serie temporal se distingue que las curvas de superficie lagunar profunda presentan amplia diferencia de valores entre los registros de verano e invierno entre 1985 y 2012, pero posteriormente durante

2013 a 2019 esta diferencia se reduce. Sin embargo, al comparar las superficies lagunares totales de otoño con las de primavera el contraste entre temporadas es menor, exceptuando al año 1997.

La desviación estándar de los registros de la superficie lagunar profunda para las estaciones del año en orden mayor a menor es: invierno (24,33 ha), otoño (14,57 ha), primavera (8,10 ha) y verano (7,30 ha; Tabla 6-15). Esto sugiere que la estación invernal es la que presenta las fluctuaciones de mayor magnitud, equivaliendo a más de tres veces la desviación estándar calculada para verano. Similarmente, el cambio relativo para las cuatro estaciones del año se ordena de la misma forma que la dispersión, siendo todas de disminución significativa: Invierno (-72,64 ha), otoño (-33,25 ha), primavera (-18,06 ha) y verano (-16,18 ha; Tabla 6-16). Respecto al cálculo de percentiles, las superficies lagunares bajo el percentil 10, se registran desde el año 2012 a 2019, para todas las temporadas, a excepción de verano 2001. En cambio, las superficies lagunares altas, sobre el percentil 90, se registran desde 1986 a 2009, en todas las temporadas (

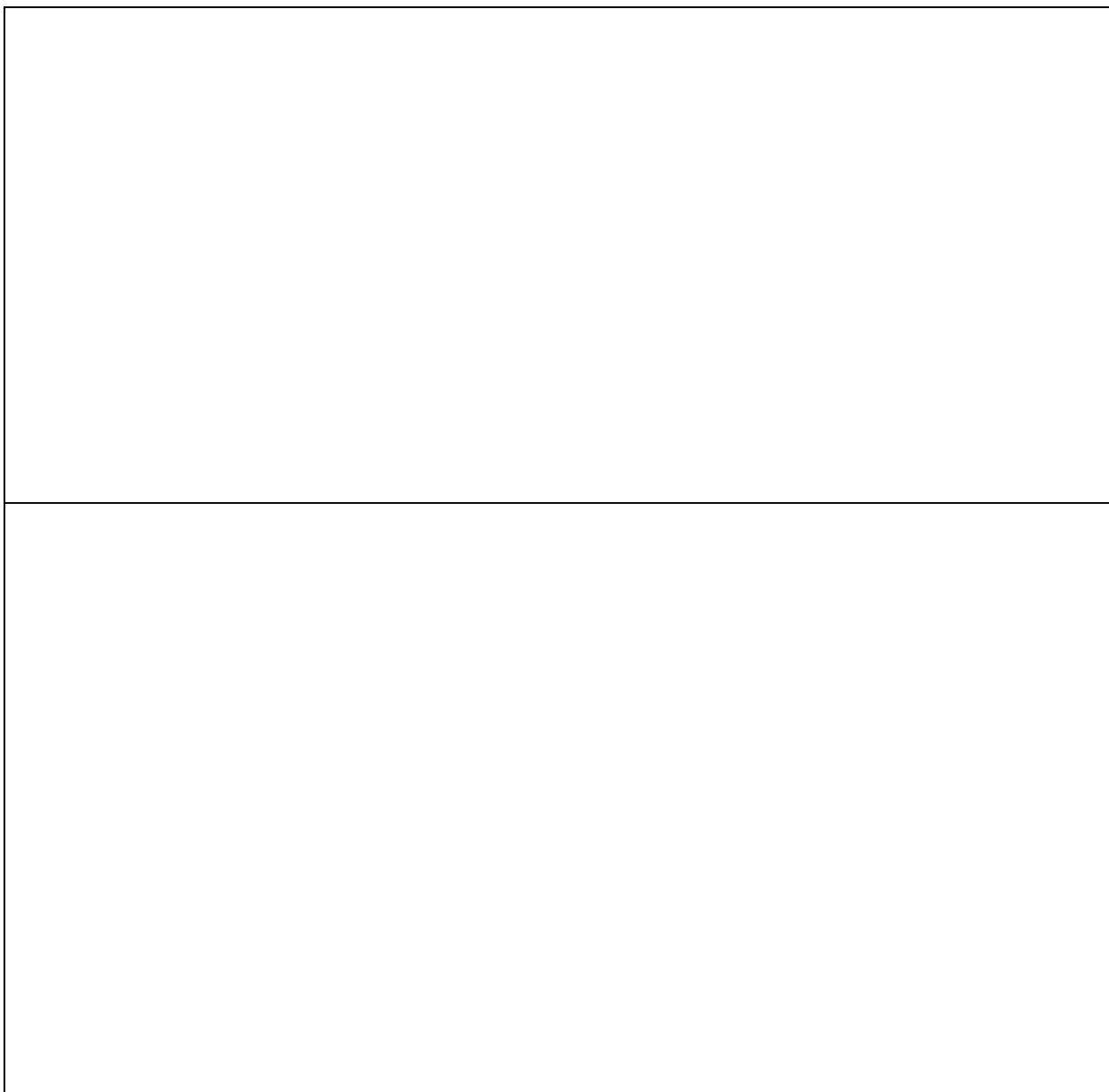


Figura 6-16 A).

A continuación, se realiza una descripción con mayor detalle para cada temporada.

### **Invierno**

Esta temporada presenta un promedio de 56,44 ha y una desviación estándar de 24,33 ha (Tabla 6-15). Se estima una reducción de 72,64 ha, que equivale a -78,30% de cambio relativo para el período 1985-2019 ( $r^2 > 0,10$ , p-valor  $< 0,001$ ; Tabla 6-16). Sin perjuicio de lo anterior, se describe que los mayores aumentos se registraron durante 1986 (97,74 ha), 1992 (100,8 ha) y 1999 (96,3 ha), siendo en 1992 la máxima invernial.

Posteriormente, entre 2008 y 2019, los valores disminuyen y convergen hacia un rango comprendido entre 40,59 ha y 22,56 ha, registrándose aumentos de menor magnitud durante 2010 (40,59 ha) y 2018 (32,22 ha) (Figura 6-17 A). Estos aumentos no coinciden con eventos de precipitación de magnitud sobresaliente registrados en EM-Peine, aunque, sí coincide con un evento de precipitación de 3,3 mm durante julio 2018 registrado en EM-Rockwood.

Al analizar los percentiles, las observaciones con valores sobre el percentil 90 (85,716 ha), se registran durante 1985 a 2000. En cambio, durante el período más reciente entre 2012 y 2019, se distinguen una concentración de valores bajo el percentil 10 (24,678 ha) durante 2012 (24,3 ha), 2015 (27,7 ha) y 2017 (23,58 ha). Es decir, los valores más altos se registran desde 1985 a 2000 y los más bajos desde 2012 a 2019, lo que coincide con la tendencia de disminución del período histórico (Figura 6-17 B).

### **Verano**

Esta temporada presenta un promedio de 23,3 ha y una desviación estándar de 7,297 ha (Tabla 6-15). Se estima una reducción de 16,18 ha, que equivale a un -51,53% de cambio relativo ( $r^2 > 0,10$ , p-valor  $< 0,05$ ; Tabla 6-16). El período comprendido entre 1985 y 2014 presenta baja variabilidad, excepto durante verano de 2001 (16,11 ha) y 2003 (45,63 ha) (Figura 6-17 A). Esta última es la máxima y coincide con un evento de precipitación de 40,5 mm registrado en EM-Peine durante febrero 2003 (Figura 6-11). Durante el período más reciente entre 2014 y 2019, las áreas fluctúan entre 8,64 ha y 20,07 ha, y durante 2018 se observa un ascenso a 26,73 ha, que coincide con el evento de precipitación de 8 mm durante febrero.

A modo comparativo entre las temporadas invierno y verano, se observa una amplia diferencia de superficie entre estas estaciones entre 1985 y 2007. En cambio, recientemente, de 2012 a 2019, la diferencia se reduce, siendo las observaciones con los valores más bajos y estables en comparación al período anterior (Figura 6-17A).

### **Primavera**

Esta temporada presenta un promedio de 25,26 ha y una desviación estándar de 8,1 ha (Tabla 6-15). Se estima una reducción de -18,06 ha, que equivale a -52,68% de cambio relativo ( $r > 0,10$  p-valor  $< 0,001$ ; Tabla 6-15). Las observaciones están comprendidas entre los valores 45,09 ha y 12,33 ha. Los valores sobre el percentil 90 (33,23 ha) se registran durante primavera de 1987 (35,1 ha), 1989 (41,67 ha), 1995 (45,09 ha), 2009 (33,48 ha). Otros aumentos de menor magnitud se registran durante 2002 a 2003 (31,14 y 31,23 ha), 2010 (26,46 ha) y 2018 (26,73 ha; Figura 6-17 B). Estos aumentos no coinciden con eventos de precipitación de magnitud sobresaliente.

Por otro lado, los valores bajo el percentil 10 se registran durante 2014 (14,04 ha), 2015 (10,62 ha), 2016 (12,87 ha) y 2019 (12,33 ha). Al realizar una comparación entre temporadas, se observa que la curva de otoño y primavera son similares durante el período desde 2003 a 2019 ( Figura 6-17 B).

### **Otoño**

Esta temporada presenta un promedio de 31,42 ha y una desviación estándar de 14,57 ha. Se estima una reducción de 33,25 ha, que equivale -69,2% de cambio relativo ( $r > 0,10$ ,  $p\text{-valor} < 0,001$ ; Tabla 6-15 y Tabla 6-16). Se destacan dos aumentos registrados durante 1992 (60,12 ha) y 1997(86,4 ha; Figura 6-17 B y

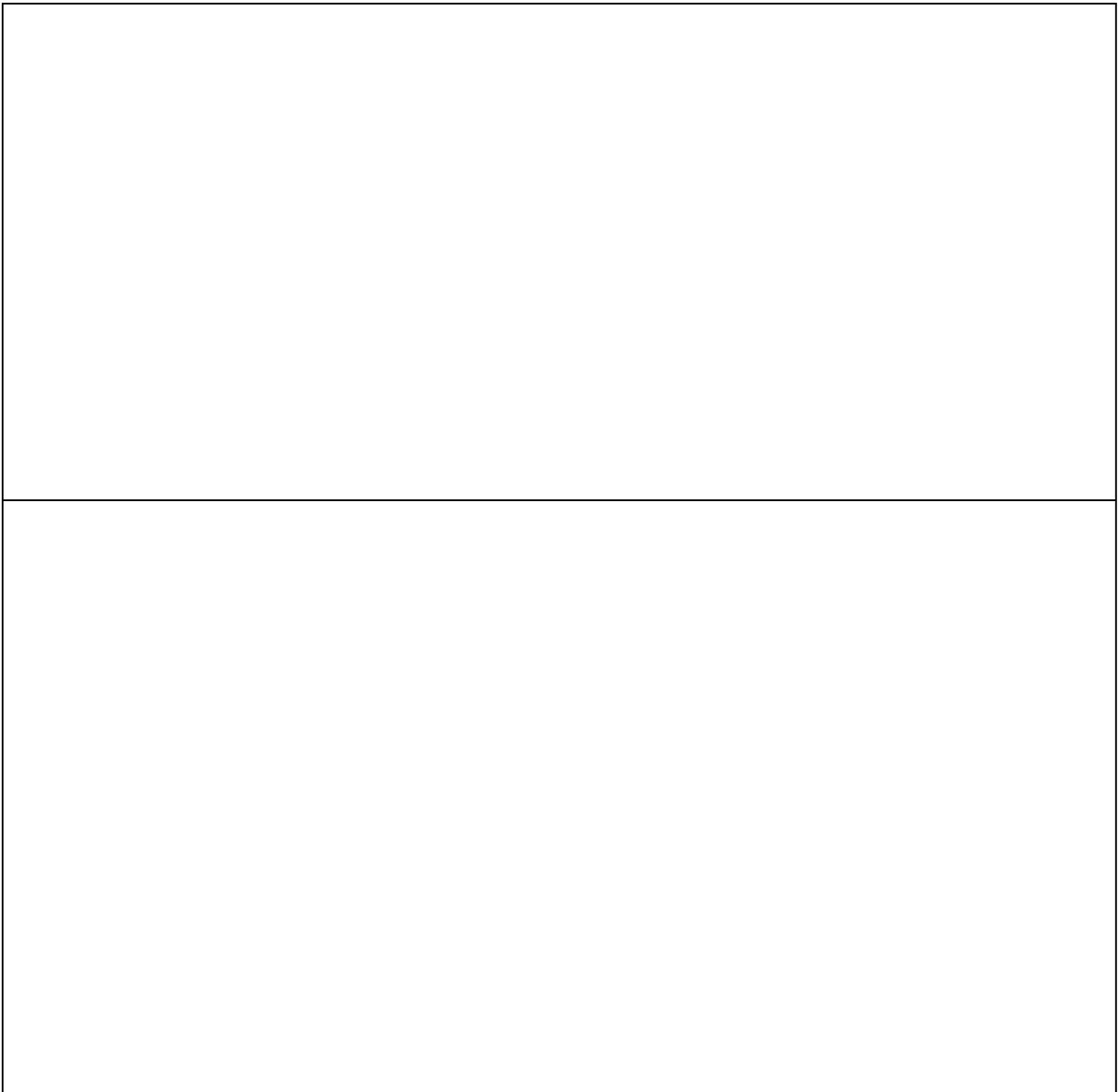
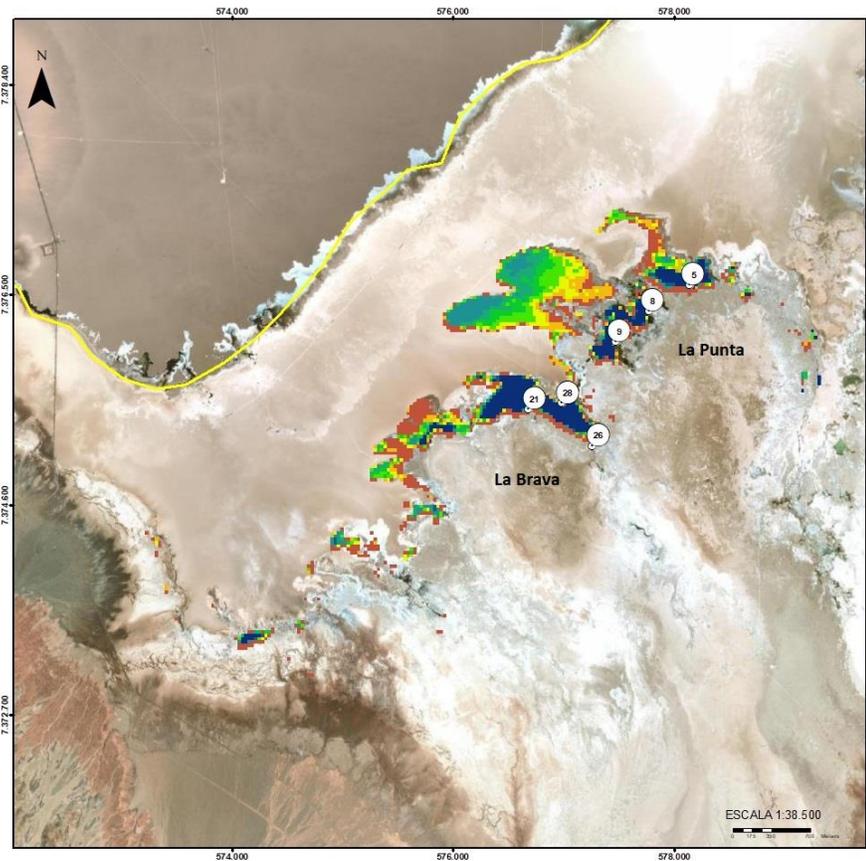


Figura 6-16 B), las que coinciden con eventos de precipitación de 10 mm durante otoño 1992 registrado en EM-Peine, y de 3,3 mm durante otoño registrado en EM-SCL (Figura 6-9 y Figura 6-11). Desde 1986 a 2000, el registro presenta valores comprendidos entre 30,33 ha a 86,4 ha. En cambio, entre 2001 y 2011 se distribuyen en un rango menor y acotado, de 21,33 ha a 31,86 ha ( Figura 6-17B). Posteriormente, luego de 2012, se observan valores menores que se distribuyen en un rango comprendido entre 20,16 ha y 6,57 ha. Esta última sucede durante otoño de 2019 y es la menor de todas las temporadas registradas, tanto de las superficies lagunares totales como de las superficies lagunares profundas, para el período de 1985 a 2019.

**c. Recurrencia de superficie lagunar**

Se presentan mapas de porcentaje de recurrencia de las superficies lagunares profundas y totales estimadas por temporada, desde 1985 a 2019. Estos fueron elaborados a partir de los Índices NDWI reclasificados (Anexo III), y obtenidos a través del análisis de imágenes satelitales Landsat.



<b>RECURRENCIA DE SUPERFICIE LAGUNAR TOTAL EN INVIERNO 1985-2019</b>		<b>DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.</b>	
<p>○ Puntos MEL</p> <p><b>Porcentaje %</b> High : 100  Low : 10</p>			
<p>ELABORADO POR AQUIST Y AMAKAIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE</p>		<p>DATOS CARTOGRÁFICOS PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR</p> <p>DATOS GEODÉSICOS DATUM: WGS 1984</p> <p>FECHA: 14-09-2020</p>	

En la

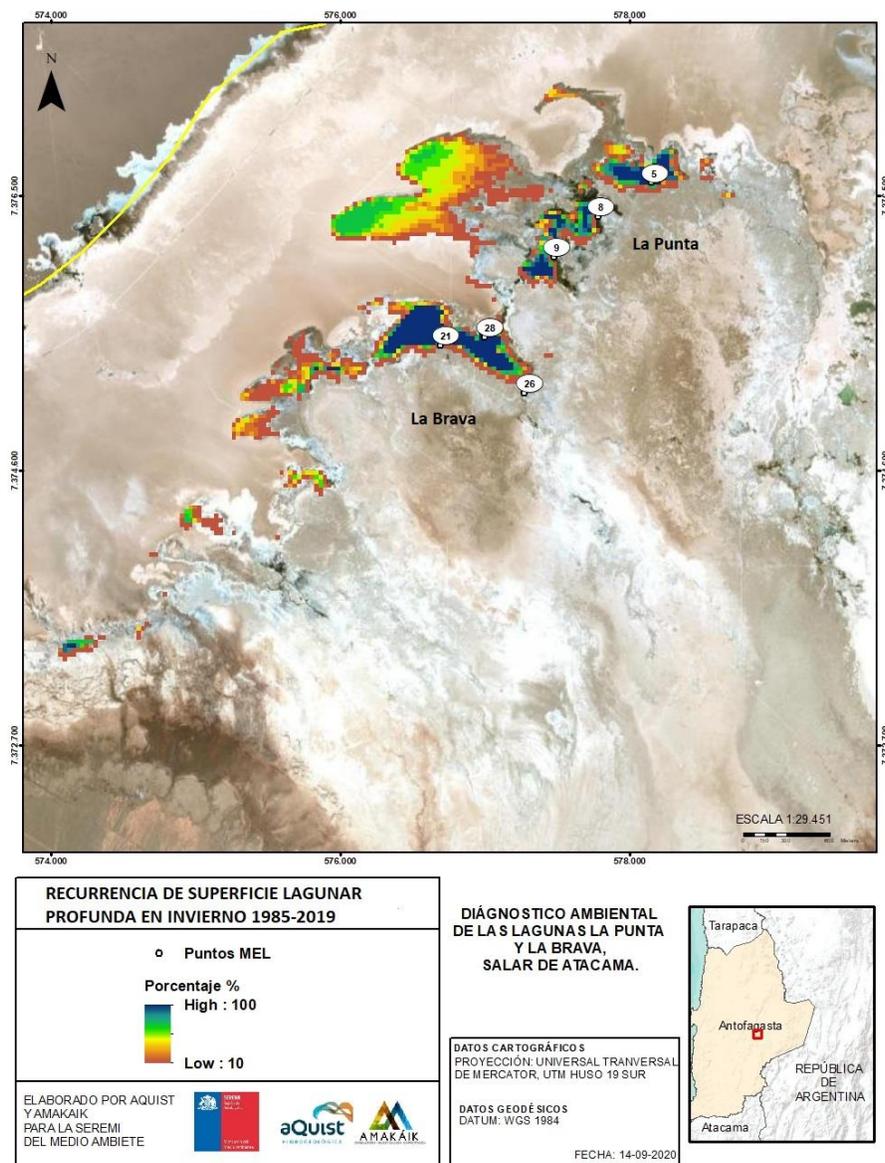
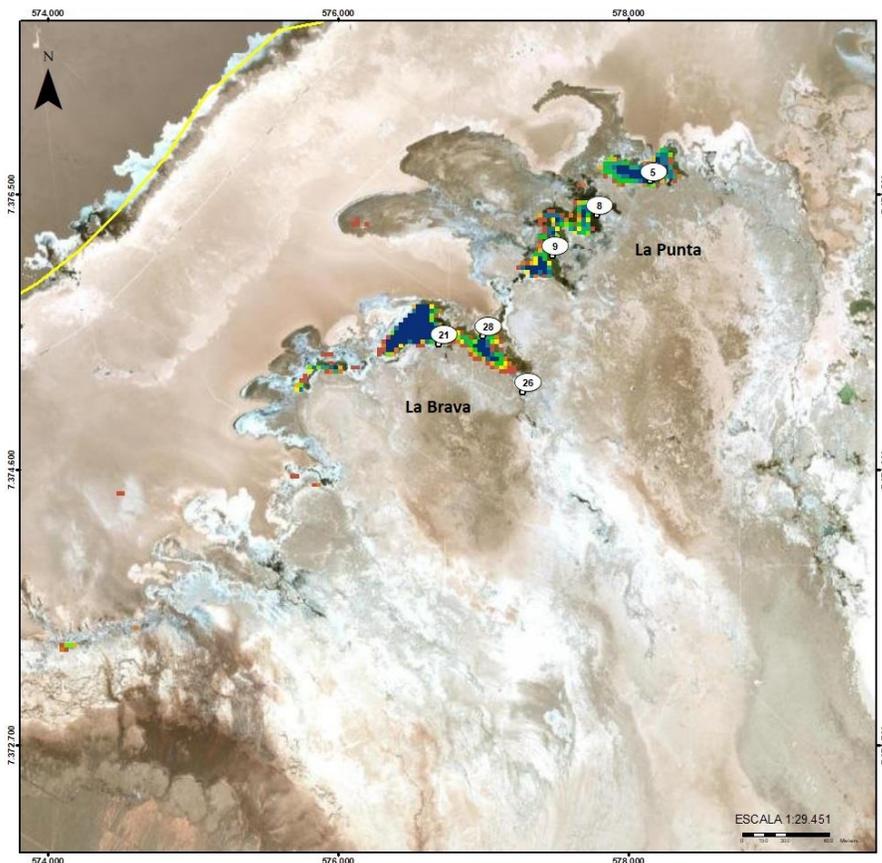


Figura 6-18,

Figura 6-19,



**RECURRENCIA DE SUPERFICIE LAGUNAR PROFUNDA EN VERANO 1985-2019**

○ Puntos MEL

Porcentaje %  
High : 90  
Low : 10

ELABORADO POR AQUIST Y AMAKAIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE

**DIAGNOSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.**

DATOS CARTOGRAFICOS  
PROYECCION: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR

DATOS GEODESICOS  
DATUM: WGS 1984

FECHA: 14-09-2020

Figura 6-20, Figura 6-21 y

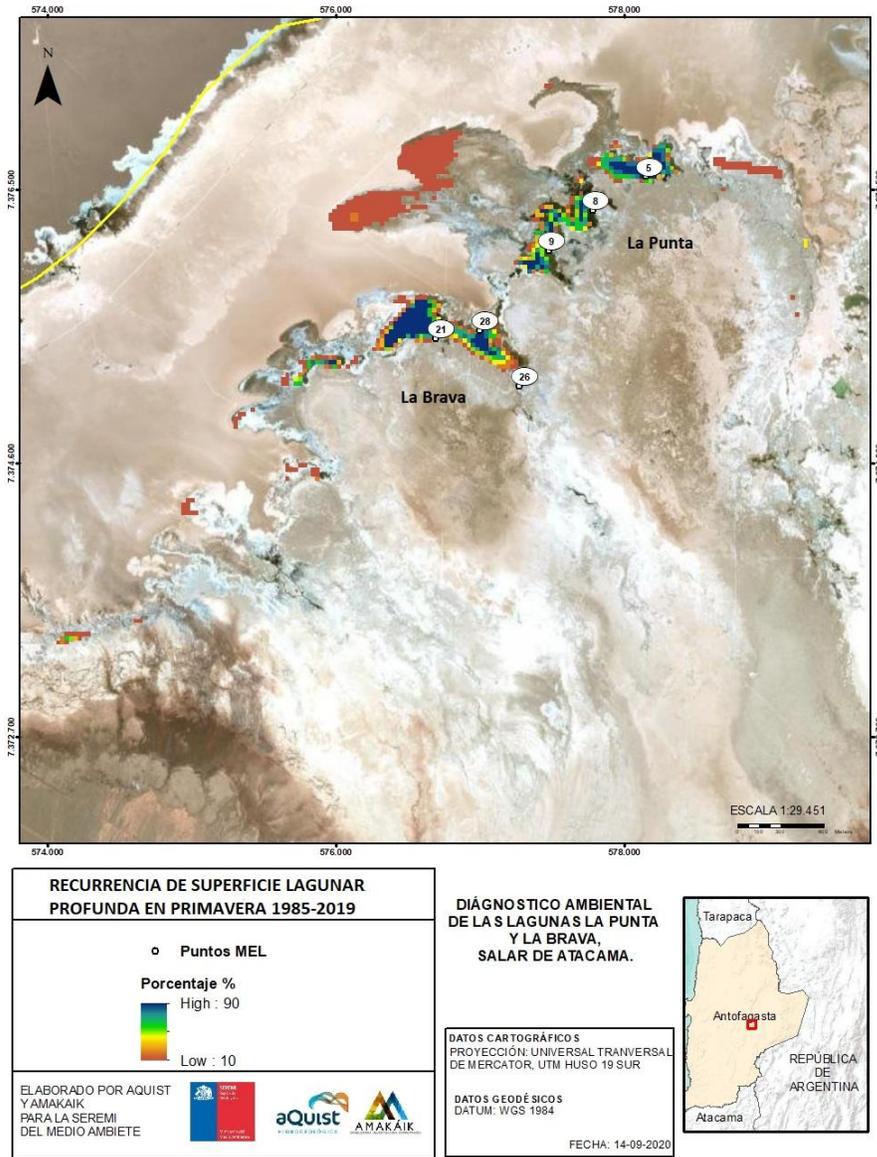


Figura 6-22 los pixeles de color azul indican superficies lagunares que permanecen durante el 90% a 100% de la temporada señalada, desde 1985 a 2019, mientras que el color naranja indica superficies lagunares que se presentan solo durante el 10% del tiempo en la temporada indicada. La información de las fechas de los períodos considerados para el análisis se puede revisar en la pestaña superficies areales de la base de datos abiótica del Anexo I.

Por otro lado, se usó la numeración de las reglillas de Minera Escondida, para localizar y describir los cambios de las superficies lagunares.

Además, se debe mencionar que para primavera, otoño y verano se utilizaron solo 32 raster de las lagunas (archivo de pixeles obtenido a partir de imágenes satelitales), ya que el área de estudio en dos imágenes es captada con cierta diferencia de coordenadas por el satélite, por este motivo el mapa de recurrencia es de máximo de 90%.

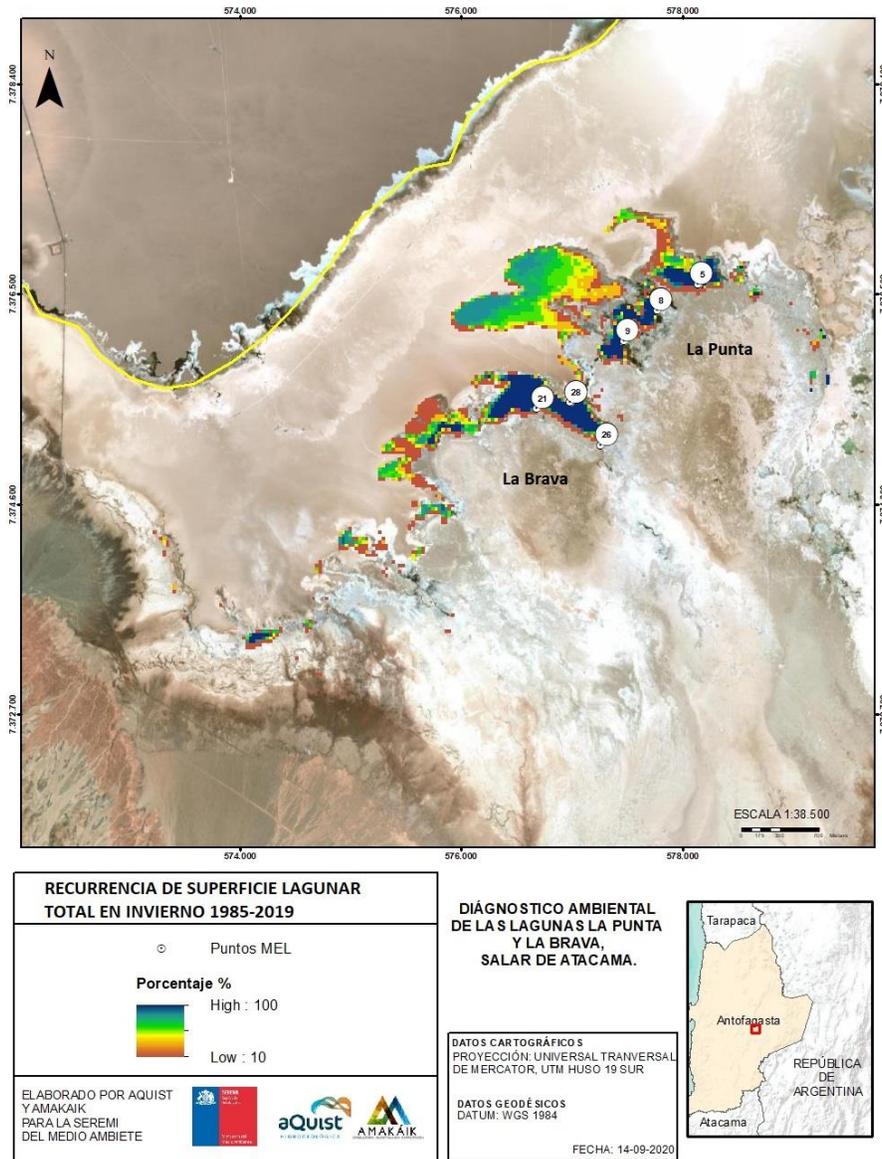
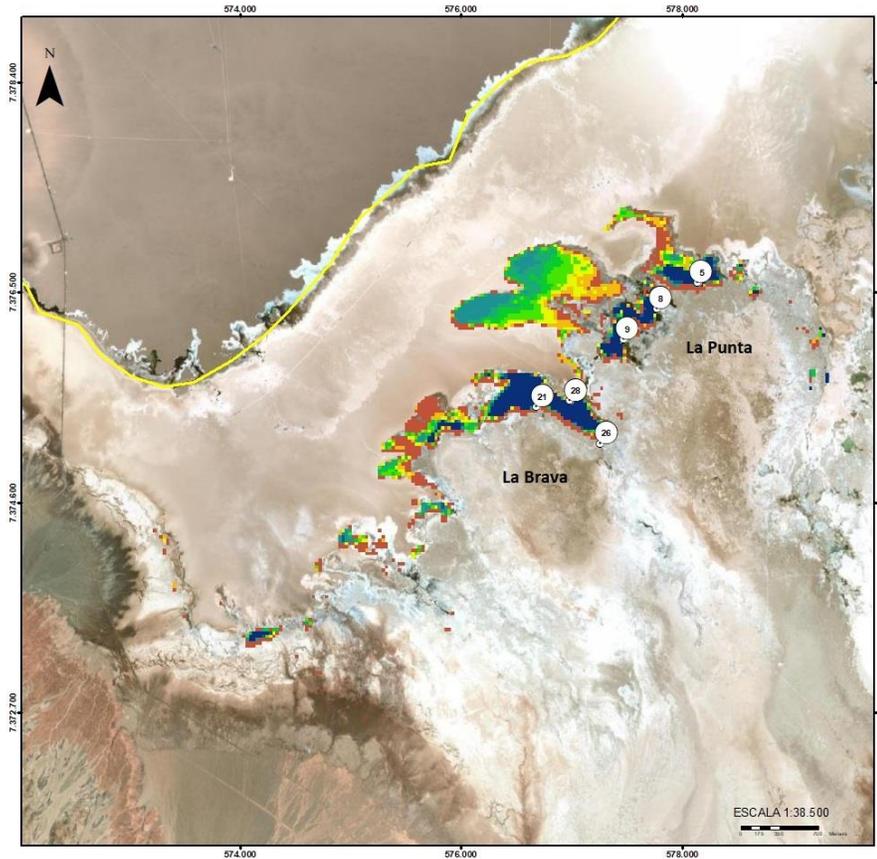


Figura 6-18 Recurrencia de superficie lagunar total en invierno, 1985 a 2019, La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia a partir de Biblioteca de índice NDWI reclasificado (Ver Anexo III)



En la

Figura 6-18 durante invierno la superficie lagunar total hacia el noroeste del punto 5, es de recurrencia 10 a 60%. Mientras que hacia el oeste del punto 9 y 8 (La Punta), se observan dos cuerpos circunferenciales alargados de recurrencia 10 a 80%. Este sector es el que más se reduce en las distintas temporadas, desde 1985 a 2019. Hacia el suroeste del punto 21 (La Brava) se observan cuerpos disgregados de recurrencia 10% a 80%, y distalmente se distinguen pixeles aislados de recurrencia 100%. Los bordes de las lagunas presentan recurrencia de 10%.

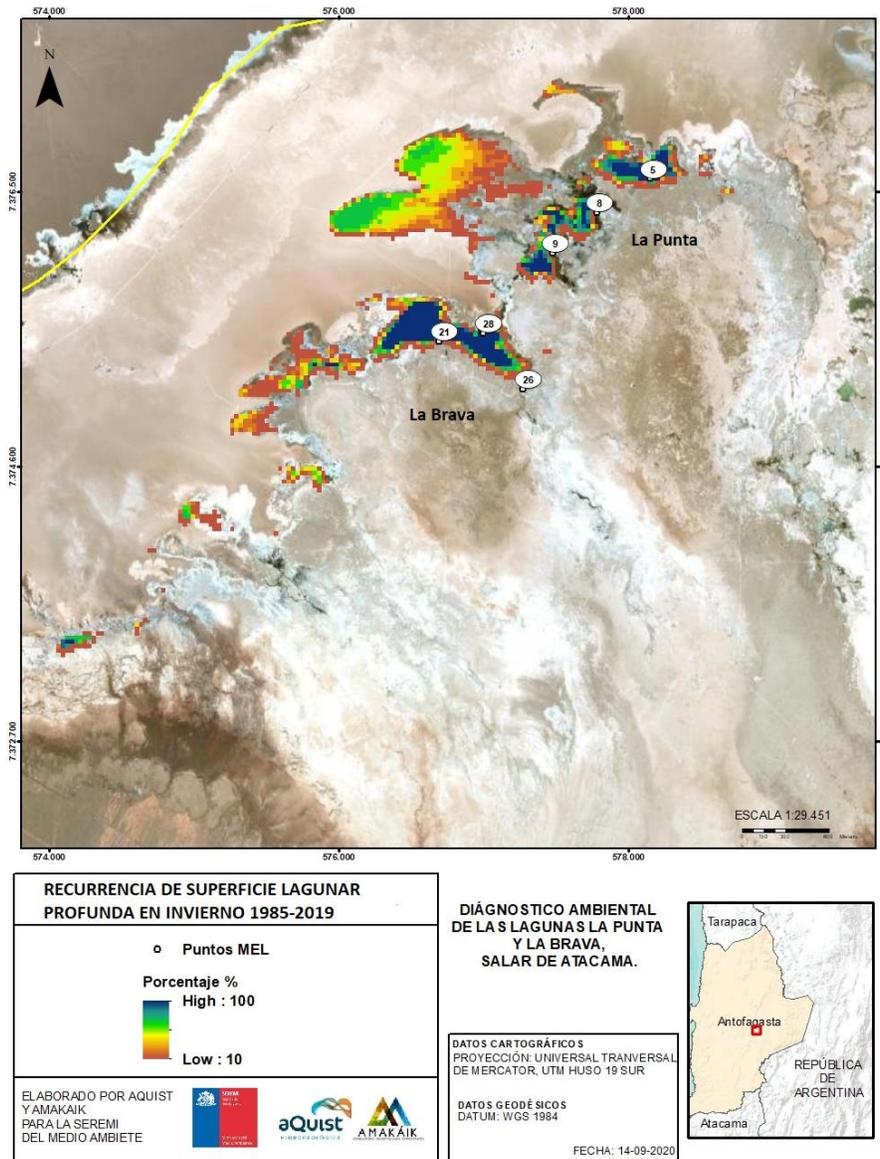
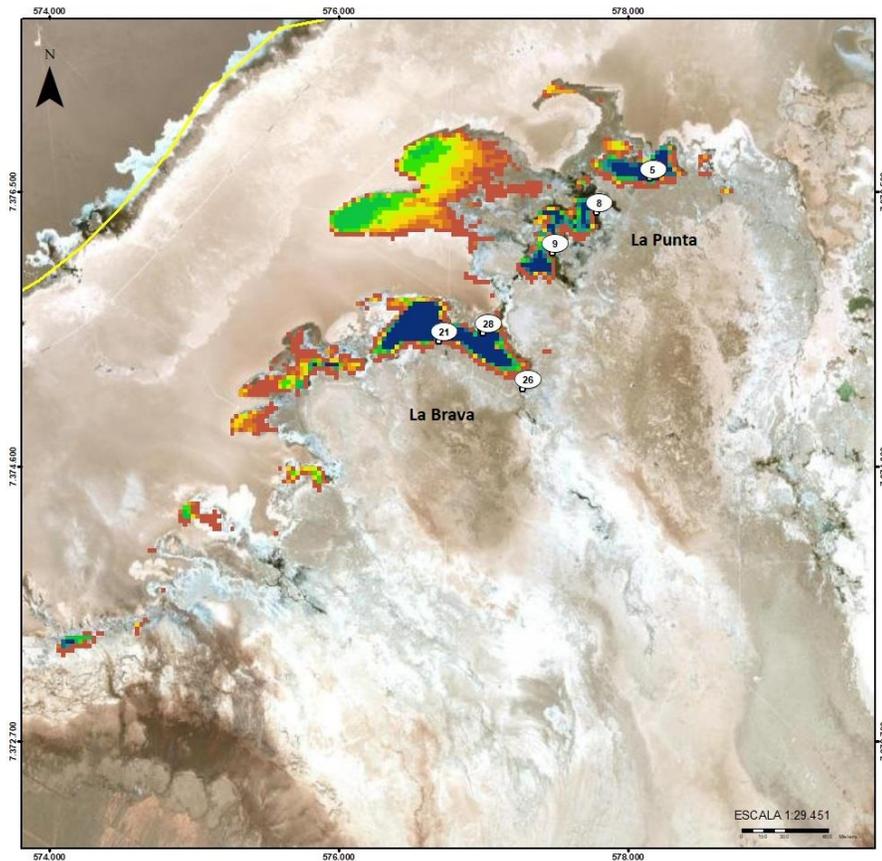


Figura 6-19 Recurrencia de superficie lagunar profunda en invierno, 1985 a 2019, La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia a partir de Biblioteca de índice NDWI reclasificado (Ver Anexo III)



En la

Figura 6-19 los cuerpos de superficie lagunar profunda, formados alrededor de los puntos 5 y 21, en los extremos norte y oeste de La Punta, y suroeste de la Brava se reducen en comparación a las superficies lagunares totales de invierno. La recurrencia de los cuerpos formados hacia el extremo oeste de los puntos 8 y 9 es de 10 a 60%.

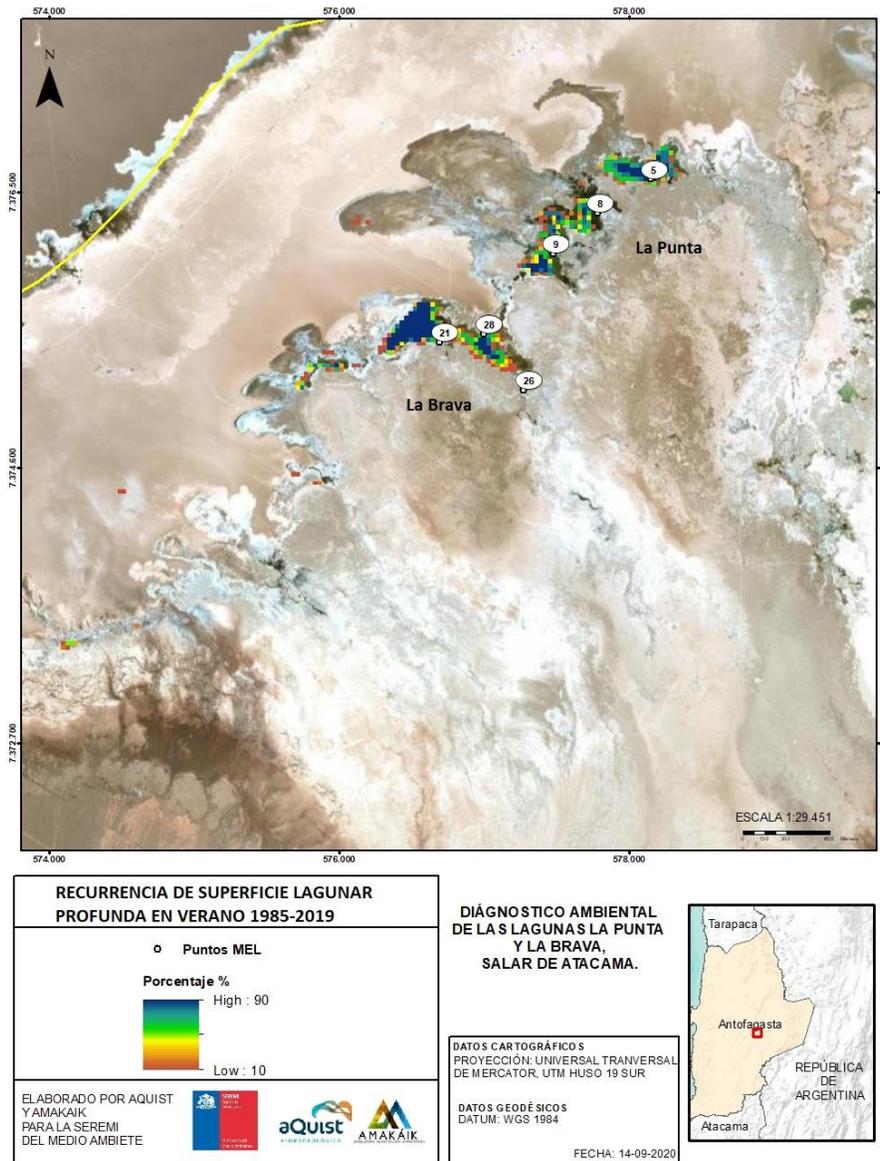


Figura 6-20 Recurrencia de superficie lagunar profunda en verano, 1985 a 2019, La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia a partir de Biblioteca de índice NDWI reclasificado (Ver Anexo III)

En verano las superficies lagunares profundas en los extremos norte y oeste de la laguna La Punta, y suroeste de la Brava desaparecen (

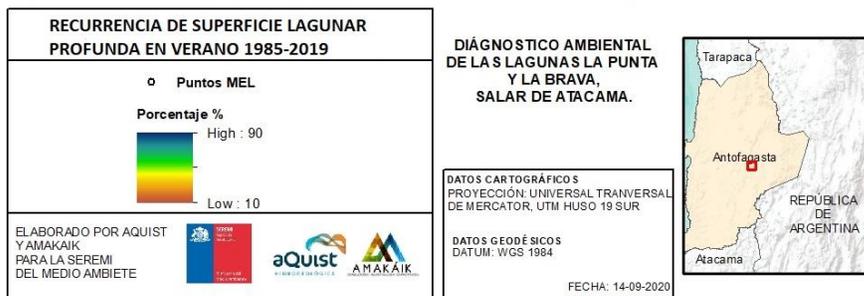
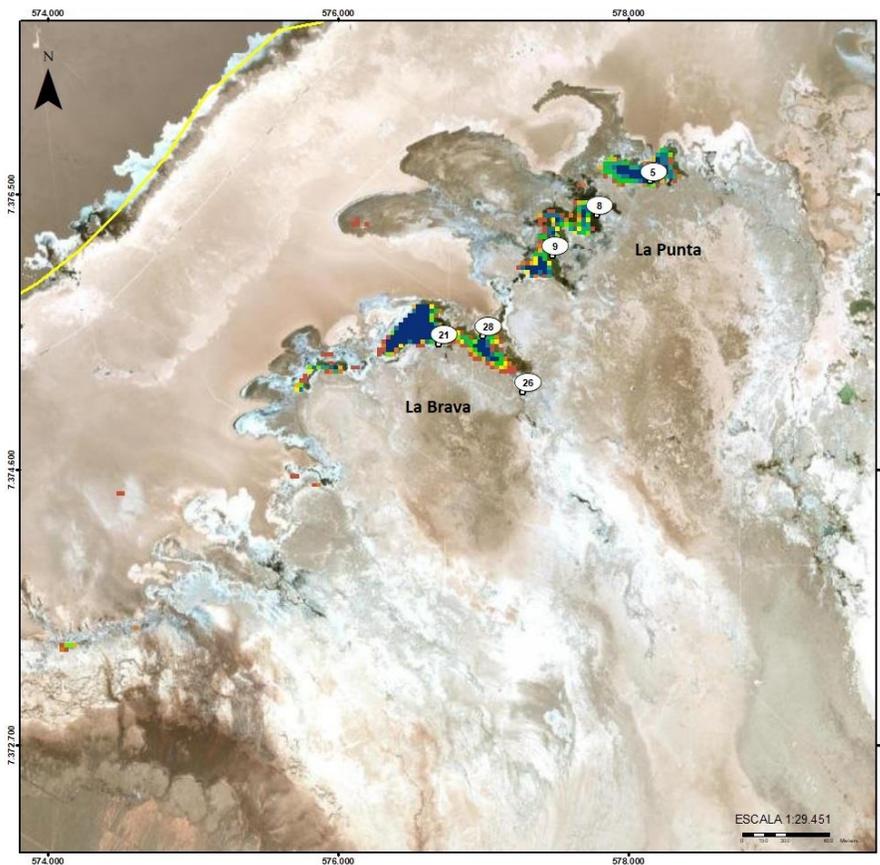


Figura 6-20), además en verano es cuando más se reducen ambas lagunas.

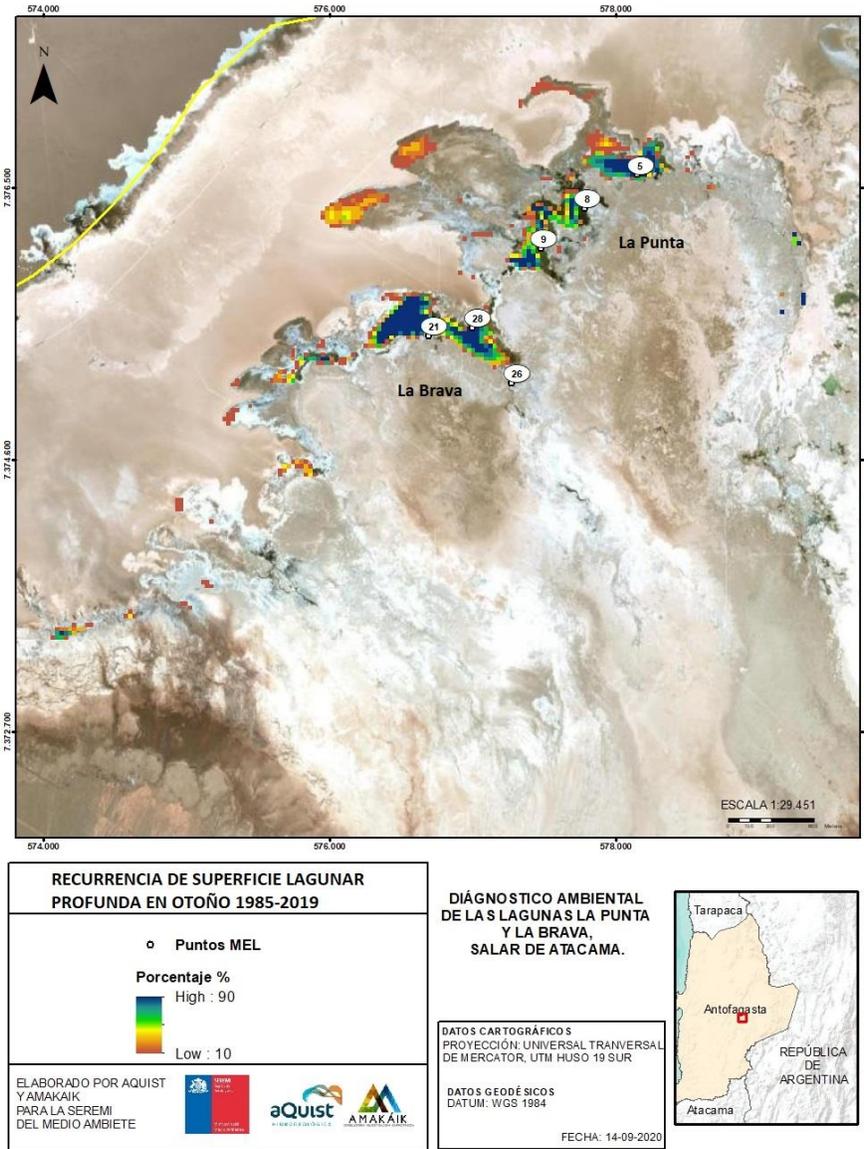


Figura 6-21 Recurrencia de superficie lagunar profunda en otoño, 1985 a 2019, La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia a partir de Biblioteca de índice NDWI reclasificado (Ver Anexo III)

En la Figura 6-21, durante otoño los cuerpos circunferenciales de superficie lagunar profunda, localizados hacia el oeste de La Punta se reducen, quedando solo cuerpos en los extremos a una distancia de 1 a 1,2 km desde los puntos 8 y 9, estos tienen recurrencia de 10% a 40%.

Hacia el oeste y noroeste del punto 5, se observan superficies reducidas de recurrencia 10 a 40%, como también hacia el suroeste de La Brava, donde solo se observan pixeles aislados.

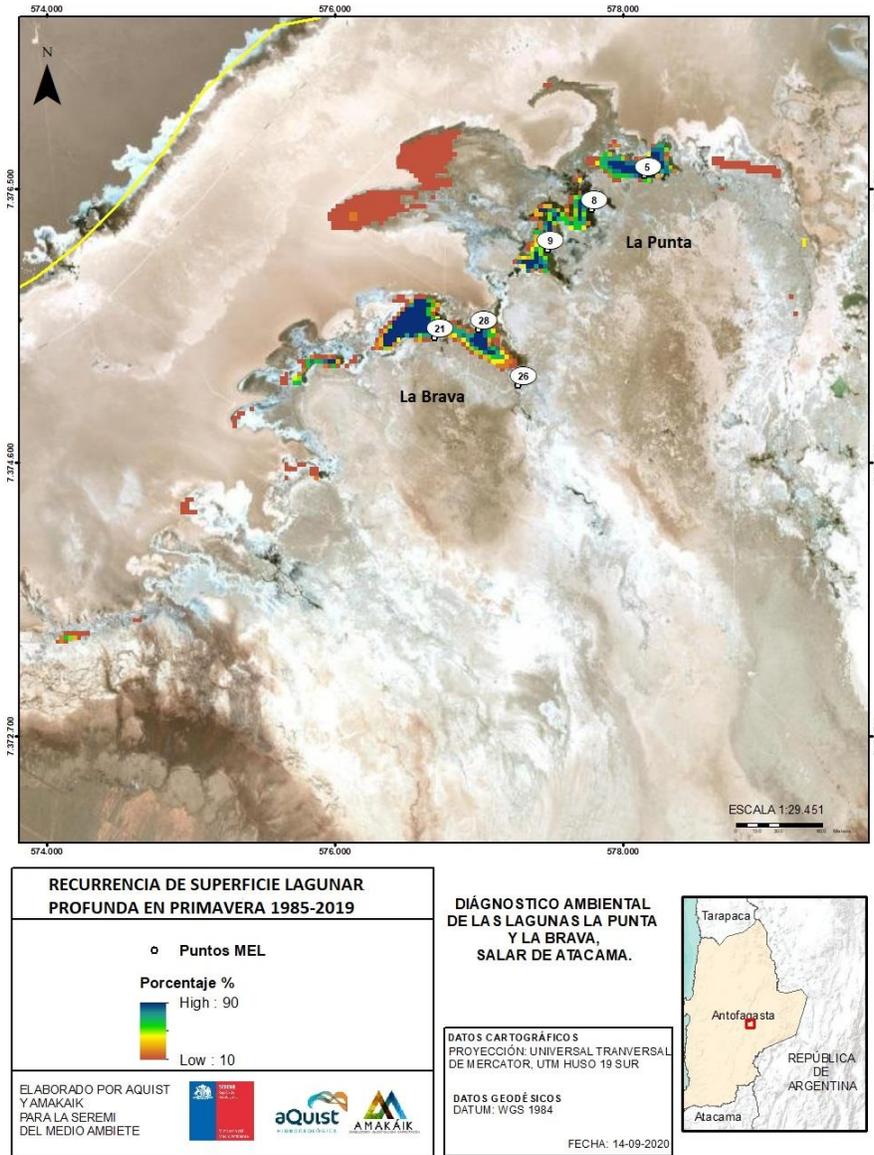
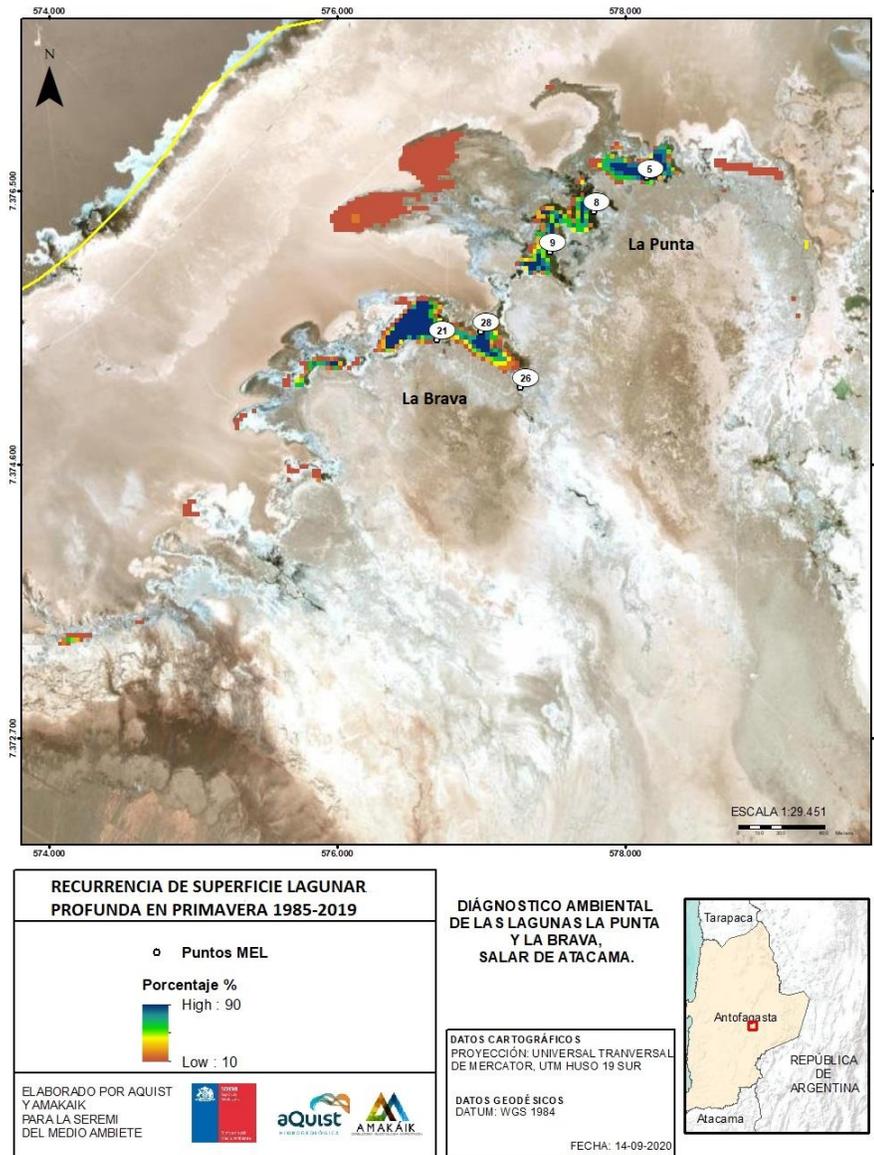


Figura 6-22 Recurrencia de superficie lagunar profunda en primavera, 1985 a 2019, La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia a partir de Biblioteca de índice NDWI reclasificado (Ver Anexo III)

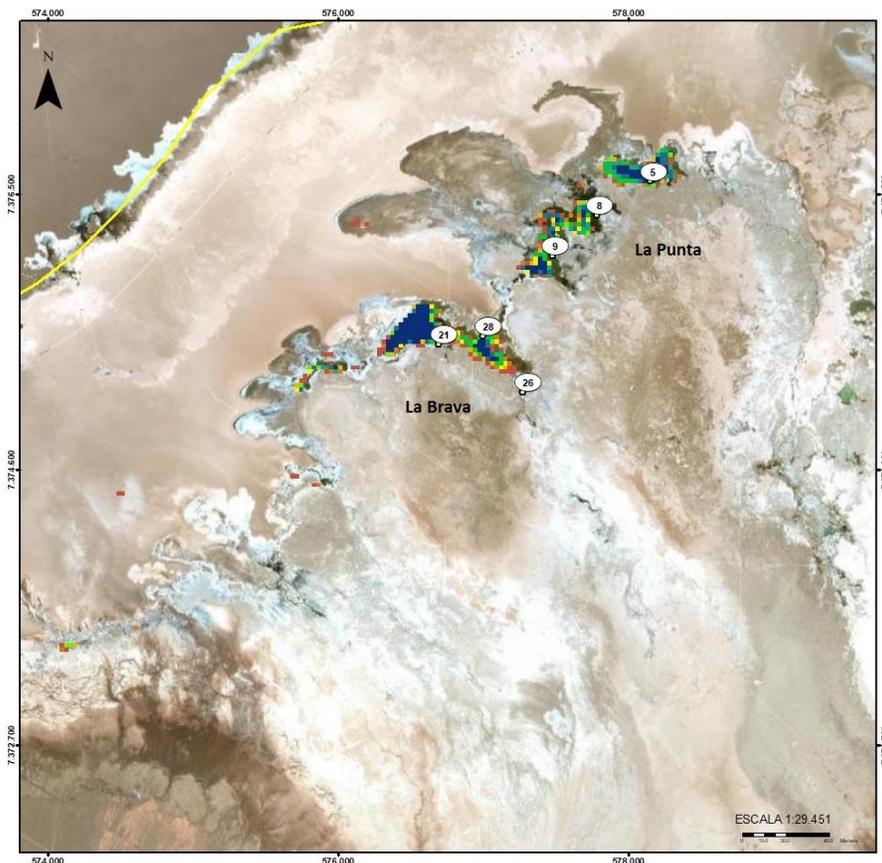


En la

Figura 6-22 los cuerpos circunferenciales hacia el oeste de La Punta desaparecen durante primavera, quedando solo superficies lagunares profundas de recurrencia baja (10%) en los extremos, localizados a una distancia de 0,8 a 1 km desde los puntos 8 y 9.

Las superficies en los bordes de los extremos norte de La Punta y suroeste de la Brava también desaparecen, salvo por pixeles aislados de recurrencia baja (10%).

La recurrencia y distribución de la superficie lagunar profunda alrededor de los puntos 8 y 9 es similar durante verano, otoño y primavera (



**RECURRENCIA DE SUPERFICIE LAGUNAR PROFUNDA EN VERANO 1985-2019**

○ Puntos MEL

Porcentaje %  
High : 90  
Low : 10

ELABORADO POR AQUIST Y AMAKAIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE

**DIAGNOSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.**

DATOS CARTOGRAFICOS  
PROYECCION: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR

DATOS GEODESICOS  
DATUM: WGS 1984

FECHA: 14-09-2020

Figura 6-20, Figura 6-21 y

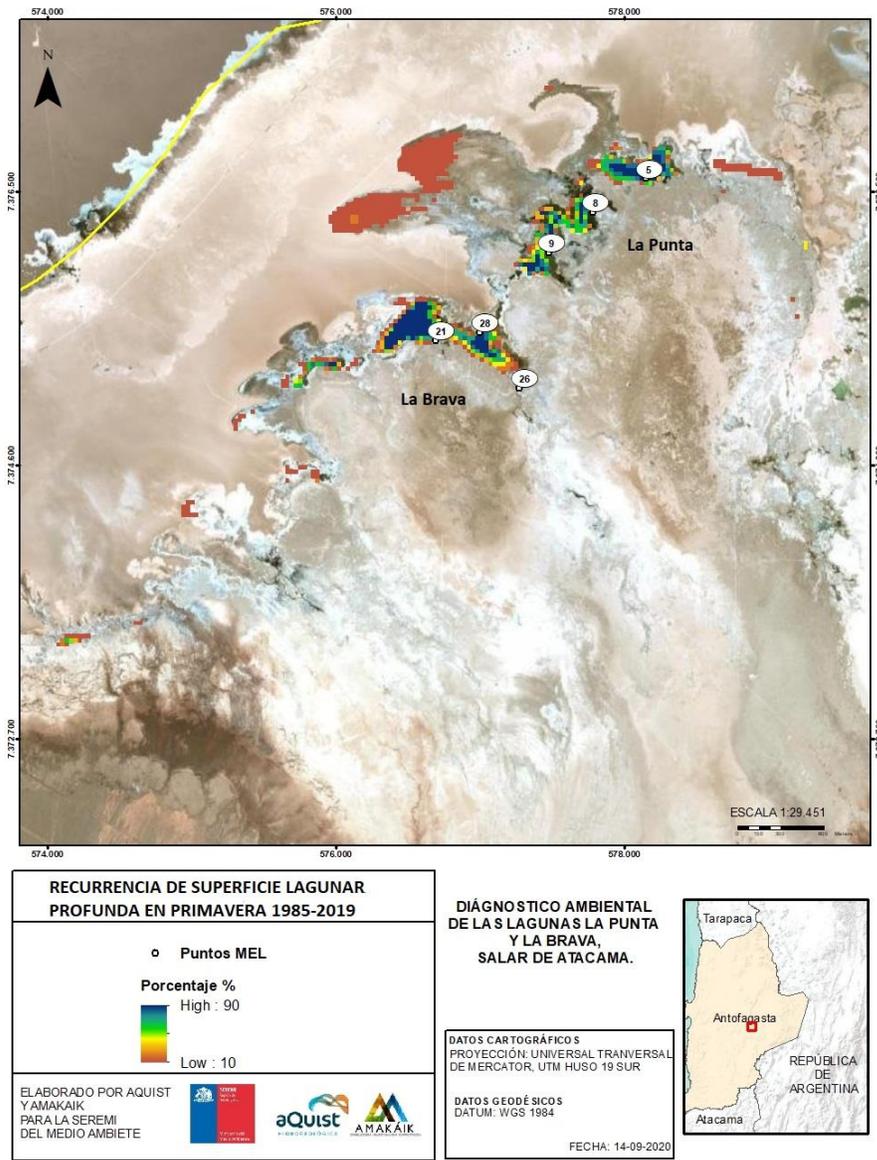


Figura 6-22).

Además, los cuerpos lacustres profundos que se forman alrededor de los puntos 21, 8, 9 y 5, han variado entre un 10% a un 80% del tiempo durante las 4 temporadas del año desde 1985 a 2019, registrándose mayores

variaciones en verano, otoño y primavera (

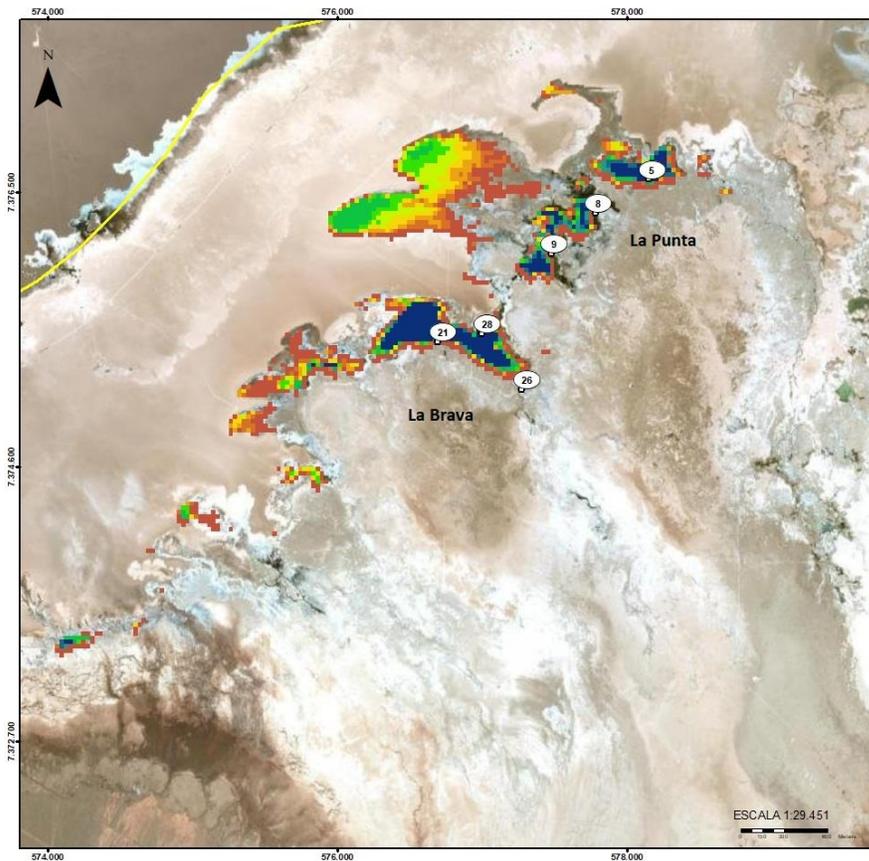
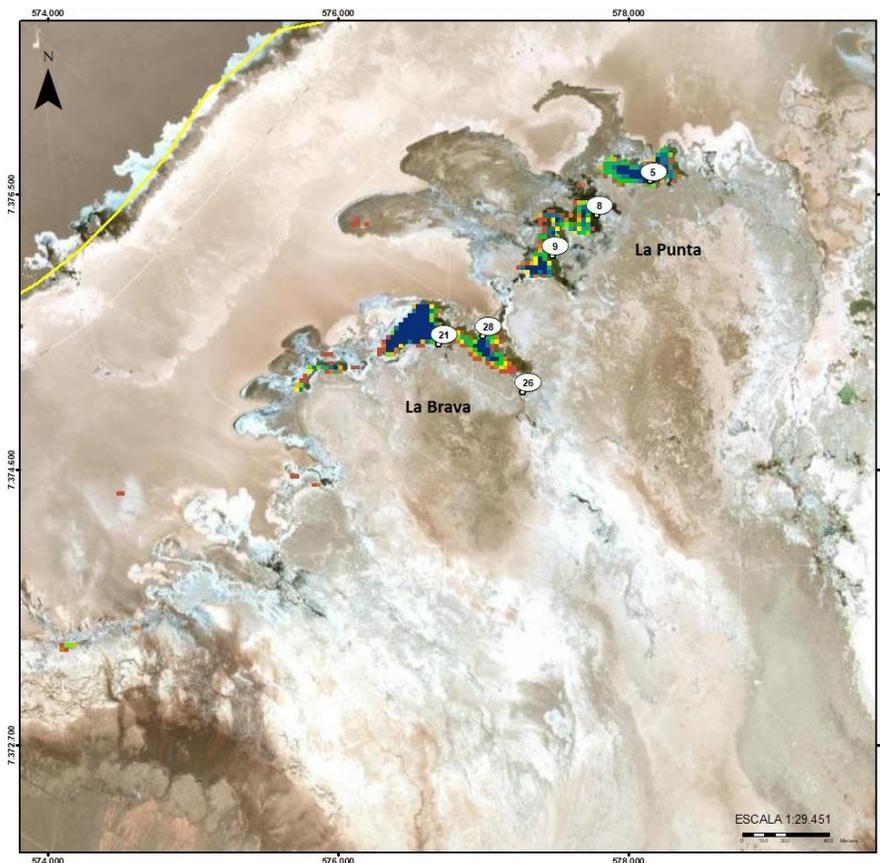


Figura 6-19,



**RECURRENCIA DE SUPERFICIE LAGUNAR PROFUNDA EN VERANO 1985-2019**

○ Puntos MEL

Porcentaje %  
High : 90  
Low : 10

ELABORADO POR AQUIST Y AMAKAIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE

**DIAGNOSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.**

DATOS CARTOGRAFICOS  
PROYECCION: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR

DATOS GEODESICOS  
DATUM: WGS 1984

FECHA: 14-09-2020

Figura 6-20,

Figura 6-21

y

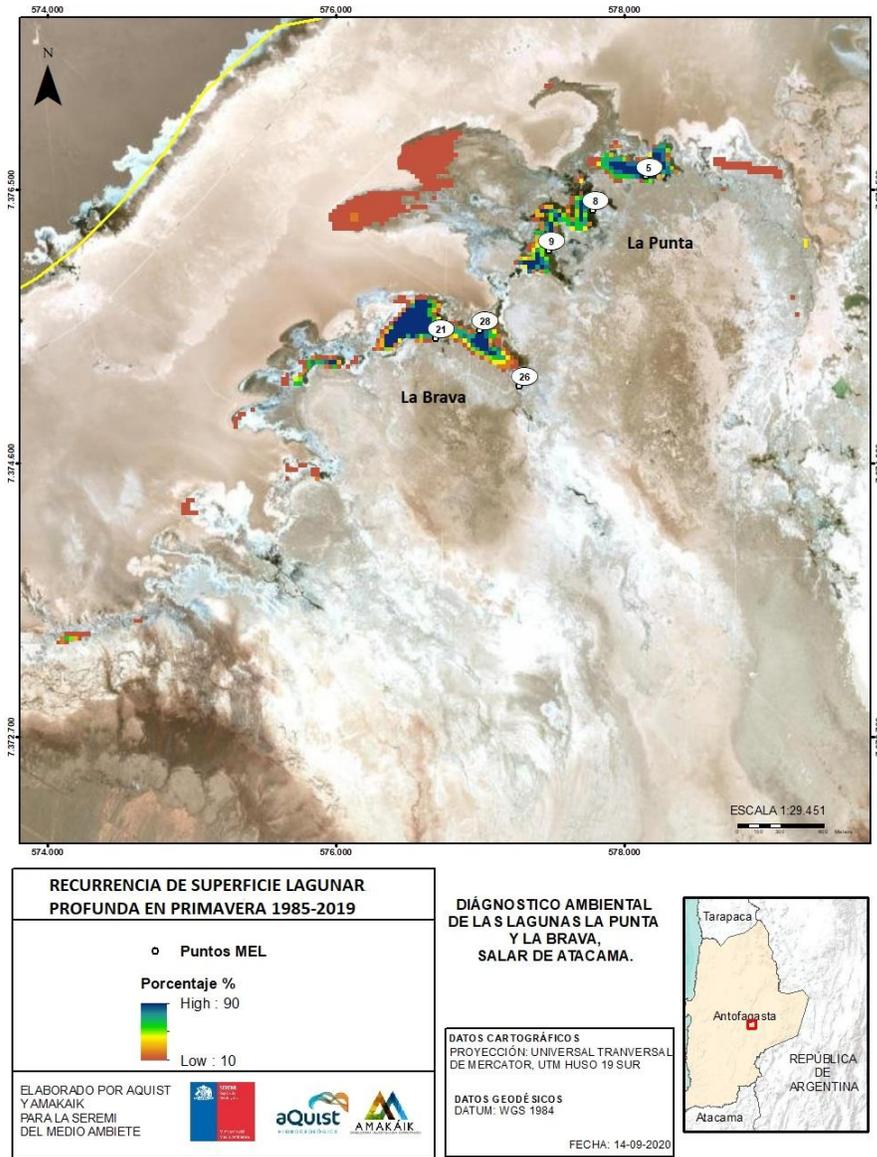


Figura 6-22).

Tabla 6-17 Cuerpos de superficies lagunares profundas que permanecen 90 a 100% de las temporadas, desde 1985 a 2019

Fuente: Elaboración propia a partir de Biblioteca de índice NDWI reclasificado (Ver Anexo III)

Temporada	La Punta	La Brava
	Cuerpo alrededor de punto 5 (ha)	Cuerpo alrededor de punto 21 (ha)
Invierno	4,32	14,58
Verano	2,79	7,29
Otoño	3,78	9,36
Primavera	3,33	7,47

Sin embargo, cuerpos profundos han desde 1985 a cada

algunos lacustres permanecido 2019, para temporada,

estimándose sus áreas para los formados alrededor de los puntos 5 y 21 (

Tabla 6-17).

Los cuerpos permanentes de superficie lagunar profunda, formados alrededor del punto 21 (La Brava) son mayores en las 4 temporadas, respecto de los formados alrededor del punto 5 (La Punta) (

Tabla 6-17). Además, los formados alrededor del punto 21 son similares durante verano y primavera, mientras que los formados alrededor de punto 5 son similares durante primavera y otoño.

#### d. Superficie de agua de Dilución Salina

Se estimó la superficie de agua en zona de dilución salina (borde sur del núcleo del Salar), localizada al noroeste de las lagunas La Punta y La Brava (Figura 4-1 El área de estudio (Figura 4-1), comprende las lagunas La Punta y La Brava, localizadas en la zona marginal sur del Salar de Atacama (576.554 E/ 737.555.595 S, Datum WGS-84), Región de Antofagasta.

Tabla 4-1 Vértices de polígono área indirecta

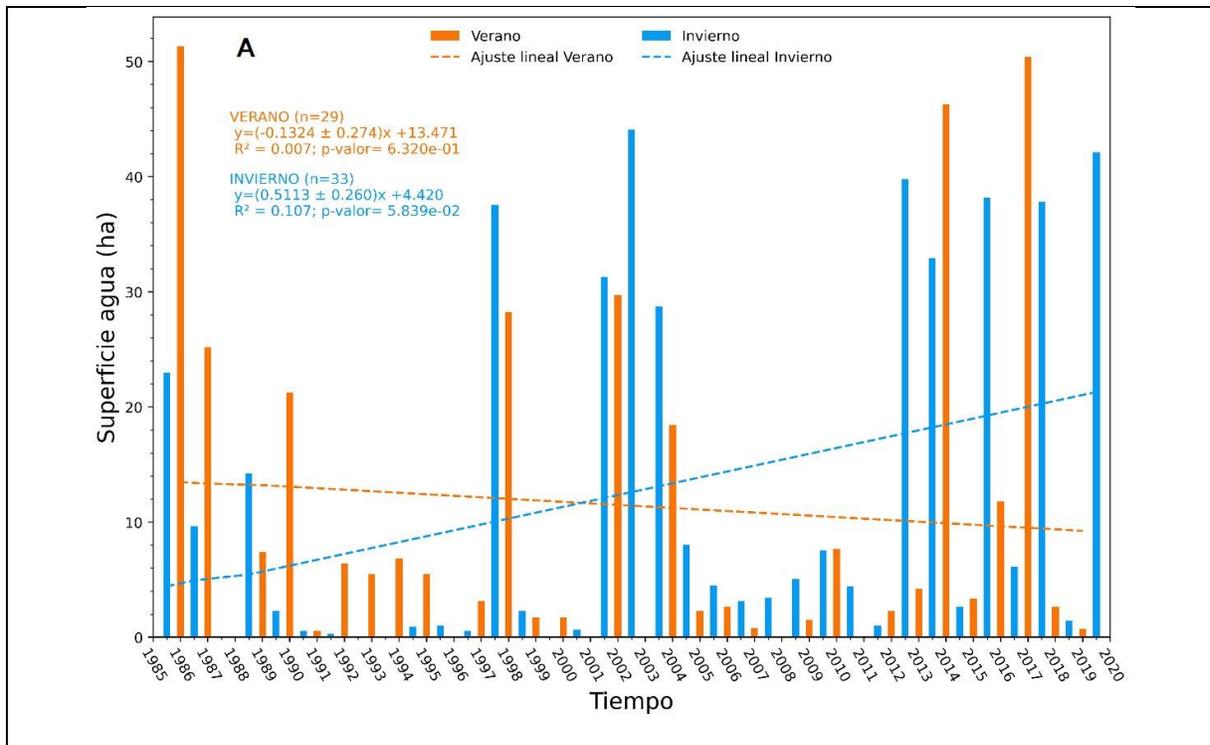
Vértices	Coordenadas UTM (Datum WGS84)	
	Este (m)	Norte (m)
1	573.516,216	7.377.604,584
2	579.389,978	7.377.604,584
3	579.389,978	7.373.085,491
4	573.505,633	7.373.096,075

Fuente: Elaboración propia

), durante la data histórica desde 1985 a 2019.

Durante el proceso de clasificación de agua, el software arrojó error en las siguientes temporadas: verano 1996, verano 2003, verano 2008, verano 2011, otoño 1998 e invierno 1999, por lo que se omitieron esos datos.

Se realizó un el análisis de series temporales cuyos resultados muestran un pobre ajuste a un modelo lineal y pendientes que no difieren significativamente de cero (invierno  $r^2=0,107$ , p-valor > 0,05; verano  $r^2=0,007$ , p-valor > 0,05; otoño  $r^2=0,107$ , p-valor > 0,05; primavera  $r^2=0,010$ , p-valor > 0,05). De este modo, los resultados para el análisis de series temporales para la superficie de la zona de dilución salina para todas las temporadas carecen de significancia estadística.



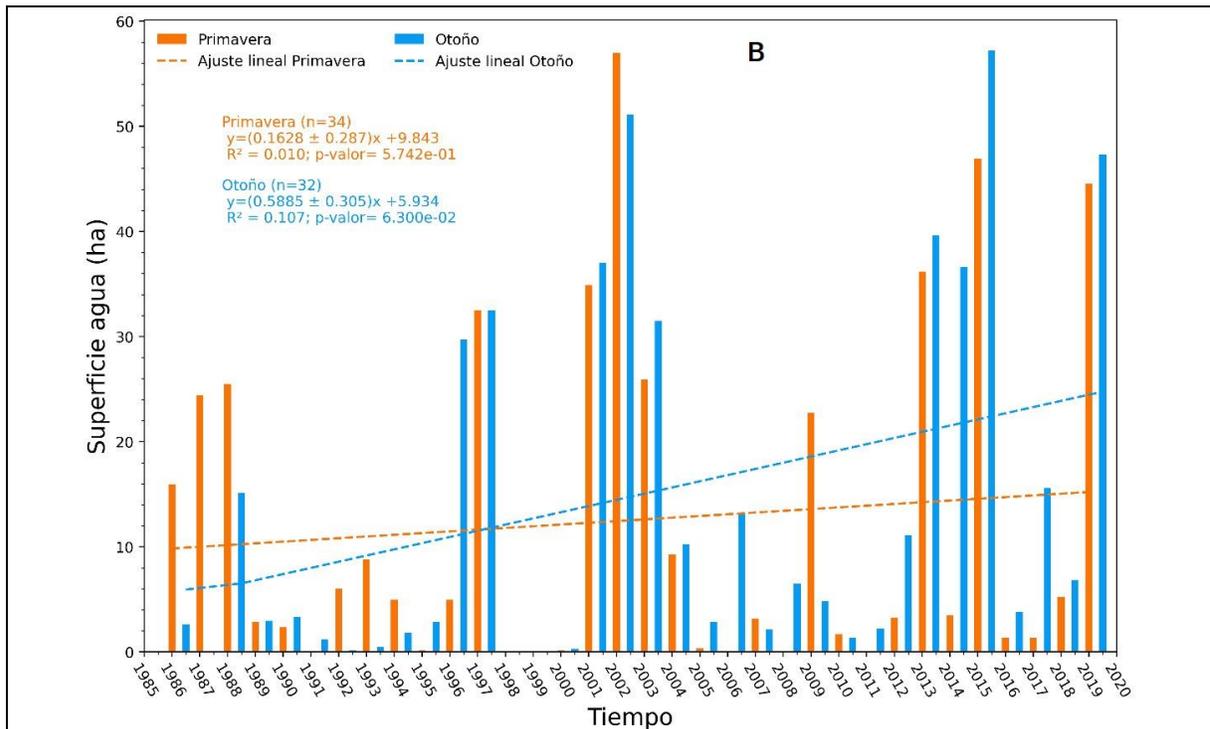


Figura 6-23 Superficie de agua en zona de dilución salina (borde sur del núcleo del Salar), 1985- 2019, (A): verano e invierno, (B): otoño y primavera

Fuente: Elaboración propia

Los valores durante todas las temporadas presentan una elevada dispersión, fluctuando en un rango desde 0,00 ha hasta 57,24 ha. Aumentos coincidentes para las cuatro temporadas se registran durante 1998, 2001 a 2004, 2010 y 2013 a 2017 (Figura 6-23 A y B), los que coinciden con eventos de precipitación registrados en EM-Peine, EM-SCL, EM-Rockwood y EM-Tilopozo.

Al realizar una comparación con los valores de superficie lagunar de La Punta y La Brava, se observa un aumento pronunciado para ambas, desde 2000 a 2004 (

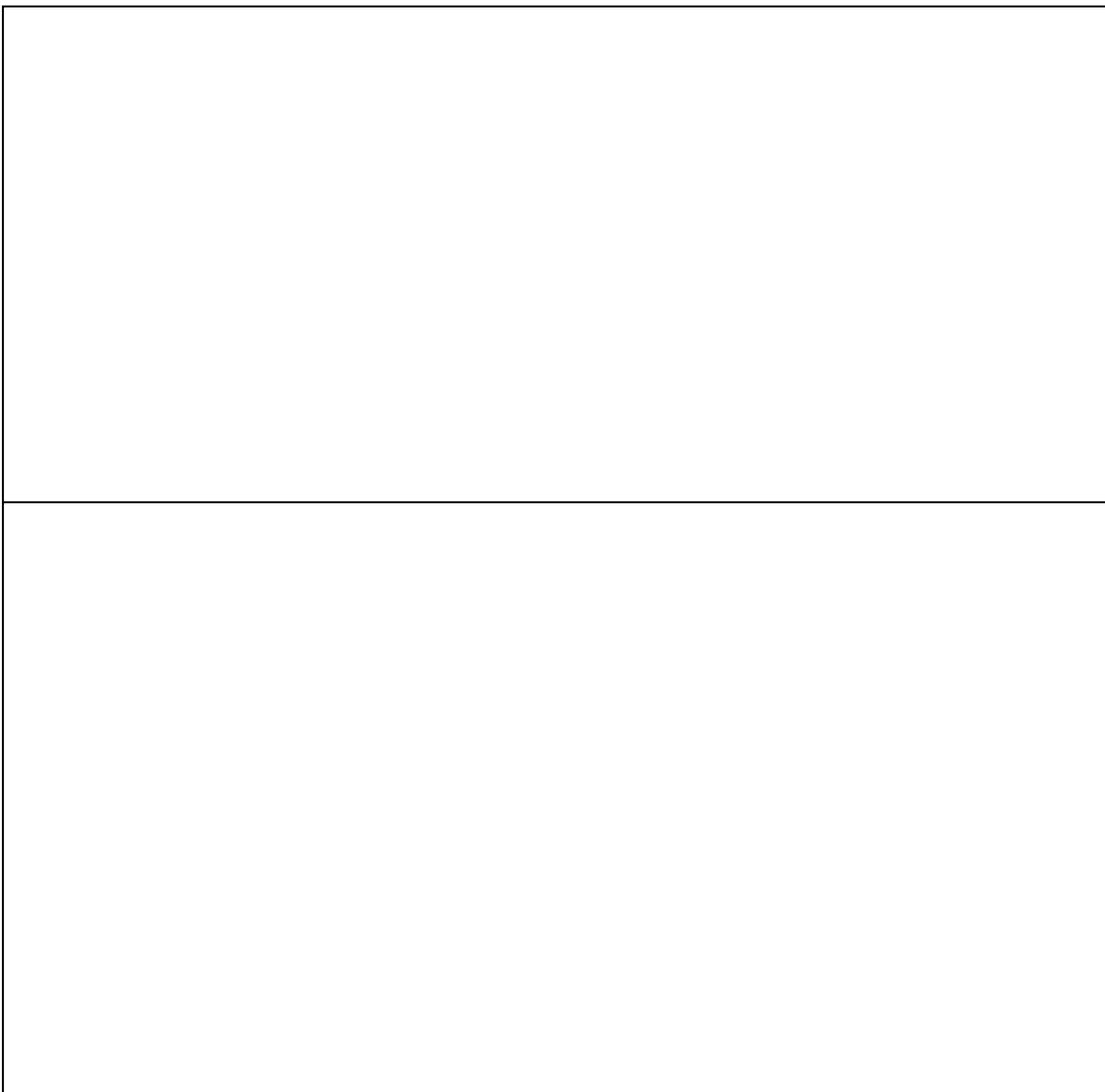


Figura 6-16 A y B, Figura 6-17 A y B).

A continuación, se presenta una descripción en mayor detalle para cada temporada.

### **Invierno**

Esta temporada presenta un promedio de 13,18 ha y una desviación estándar de 15,66 ha. El valor del percentil 90 es 34,97 ha y el de percentil 10 es 0,53 ha. El rango de valores registrados para esta temporada está comprendido entre 0,00 ha y 44,10 ha, estimándose valores de 0,00 durante invierno 1992 y 1993. Desde la serie temporal se observan que los mayores aumentos se registraron durante 1997 (37,53 ha), 2001 (31,32 ha), 2002 (44,1 ha), 2012, (39,78 ha) 2013 (32,94 ha), 2015 (38,16 ha), 2017 (37,8 ha) y 2019 (42,12 ha; Figura 6-23 A). Estos aumentos de superficie coinciden con eventos de precipitación registrados en EM-Peine durante julio 2002 (8,5 mm), agosto 2013 (9 mm) y septiembre 2019 (2 mm), con eventos de precipitación registrados en EM-SCL y EM-Rockwood durante agosto 1997 (2,2 mm), julio 2002 (17 mm) y julio 2013 (3,5 mm) y en EM-Tilopozo durante julio 2013 (4,4 mm) y agosto 2013 (2 mm). Desde 1989 a 1996 y 2004 a 2011 no se observan aumentos notables (Figura 6-9, Figura 6-10 y Figura 6-11).

Al comparar la curva de verano e invierno, se observa que los aumentos de mayor magnitud previos al 2004, se registran durante invierno y menores en verano. Sin embargo, durante 2012 a 2019 esto se invierte (Figura 6-23 A).

### **Verano**

Esta temporada presenta un promedio de 12,044 ha y una desviación estándar de 15,45 ha. El valor de percentil 90 corresponde a 31,14 ha y percentil 10 corresponde a 1,71 ha, con un máximo de 51,3 ha que se registra durante 1990 y el mínimo de 0,00 ha durante 2001.

A partir de la serie temporal se observan que los mayores aumentos se registran durante 1986 (51,3 ha), 1990 (21,24 ha), 1998 (28,26 ha), 2002 (29,7 ha), 2014 (46,26 ha) y 2017 (50,4 ha), concentrándose entre 1990 y 2017 (Figura 6-23 A). Estos aumentos coinciden con eventos de precipitación durante febrero 1986 (6 mm), enero 1990 (3,1 mm), febrero 1998 (8 mm) y febrero 2017 (45 mm) registrados en EM-Peine, y durante febrero 1998 (4 mm) en EM-SCL y enero 2014 (3,2 mm) registrados en EM-Tilopozo (Figura 6-9, Figura 6-10 y Figura 6-11).

Al comparar la curva de datos de verano e invierno, se observa que son similares, presentando ambos datos bajos durante 1992 a 1996 y de 2005 a 2011.

### **Primavera**

Esta temporada presenta un promedio de 12,53 ha y una desviación estándar de 16,23 ha. El valor del percentil 90 corresponde a 35,8 ha, y percentil 10 corresponde a 0,00 ha. El valor mínimo de 0,00 ha se estimó durante 1991, 1998, 1999, 2006, 2008 y 2001, mientras que el máximo de 56,97 ha, durante la primavera 2002.

A partir de la serie temporal se observan que los mayores aumentos se registran durante 1997 (32,49 ha), 2001 (34,92 ha) y 2002 (56,97 ha). Recientemente, desde 2013 a 2019, se registran 3 observaciones con valores sobre el percentil 90, durante 2013 (36,18 ha), 2015 (46,89 ha) y 2019 (44,55 ha; Figura 6-23 B). Hay una coincidencia con un evento de precipitación de 2,5 mm durante octubre 2015 registrado en EM-SCL.

Al comparar la curva de observaciones de primavera y otoño se aprecia que éstas son similares, observándose aumentos coincidentes (Figura 6-23 B).

### **Otoño**

Esta temporada presenta un promedio de 14,815 ha y una desviación estándar de 17,387 ha, con un máximo de 57,24 registrado durante otoño 2015, y mínimo de 0,00 ha registrado durante 1999. El valor del percentil 90 corresponde a 39,34 ha y percentil 10 corresponde a 0,52 ha.

A partir de la serie temporal se observa que los mayores aumentos se registran durante 2001 (36,99 ha), 2002 (51,12 ha), 2013 (39,6 ha), 2015 (57,24 ha) y 2019 (47,295 ha; Figura 6- 29 B), los que coinciden con eventos de precipitación durante mayo 2013 (14 mm) y abril 2019 (3,5 mm).

## **II. Base de datos Minera Escondida**

Se presenta la información histórica (2002 a 2018) de los registros de la superficie lagunar total de La Punta y La Brava, más la superficie de dilución salina (borde sur del núcleo del salar) localizada al noroeste de las lagunas (Figura 4-1 El área de estudio (Figura 4-1), comprende las lagunas La Punta y La Brava, localizadas en la zona marginal sur del Salar de Atacama (576.554 E/ 737.555.595 S, Datum WGS-84), Región de Antofagasta.

Tabla 4-1 Vértices de polígono área indirecta

Vértices	Coordenadas UTM (Datum WGS84)	
	Este (m)	Norte (m)
1	573.516,216	7.377.604,584
2	579.389,978	7.377.604,584
3	579.389,978	7.373.085,491
4	573.505,633	7.373.096,075

Fuente: Elaboración propia

). La información histórica corresponde a mediciones anuales durante verano e invierno y proviene de la base de datos del Anexo G, del Plan de Alerta Temprana 2018 de Minera Escondida.

Se debe tener en cuenta que la información del Plan de Alerta Temprana 2018 de Minera Escondida no publica los datos de superficie lagunar y de dilución salina por separado, sino la suma respectiva. Por otro lado, los polígonos usados en la medición de las lagunas y de dilución salina, son distintos a los utilizados en la base de datos propia, por lo que los resultados son distintos.

Además, la resolución espacial de los datos obtenidos es de 2,4 metros, a partir de las imágenes satelitales tipo Quickbird, WorldView – 2 y 3.

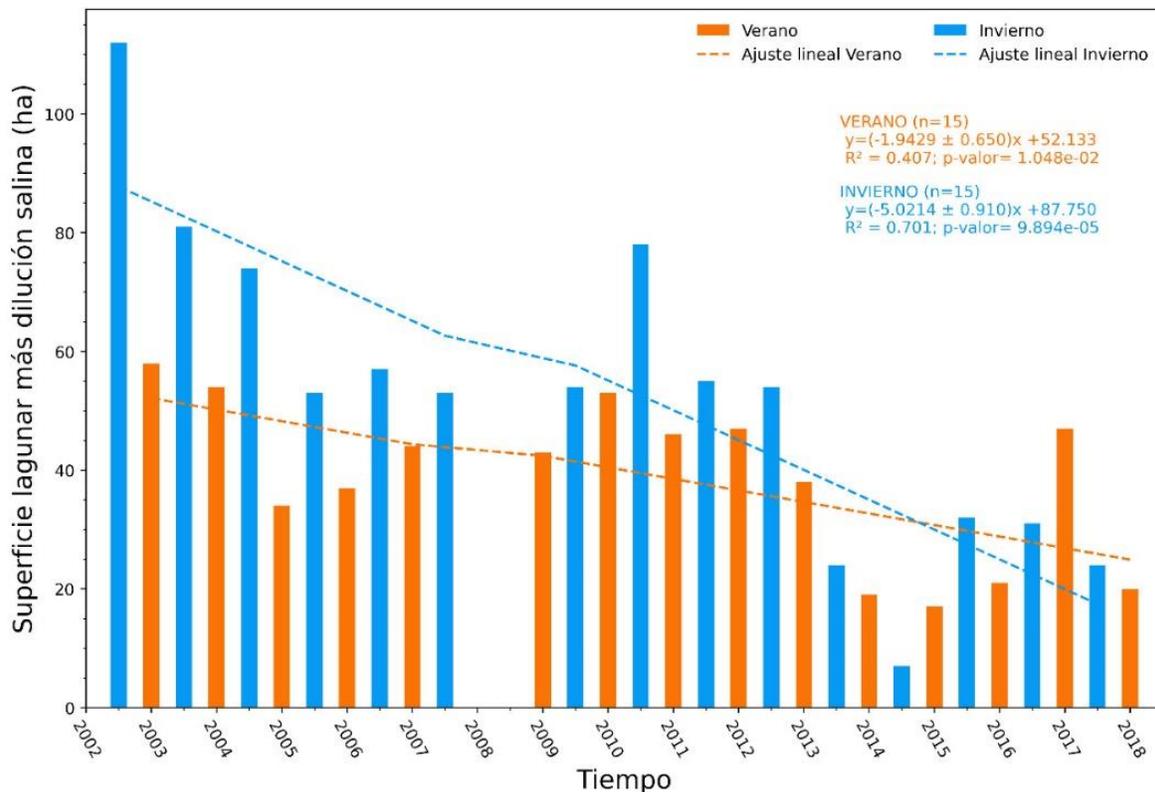


Figura 6-24 Superficie lagunar profunda y zona de dilución salina profunda, invierno y verano 2002 -2018

Fuente: Elaboración propia

Los valores de superficie lagunar más dilución salina profunda, durante invierno ( $r^2 > 0,701$  y  $p\text{-valor} < 0,001$ ) y verano ( $r^2 > 0,407$  y  $p\text{-valor} < 0,05$ ), 2002 a 2018, se ajustan a un modelo lineal con una pendiente significativamente negativa. Los mayores aumentos en la serie de invierno se registran durante 2002 y 2010 (

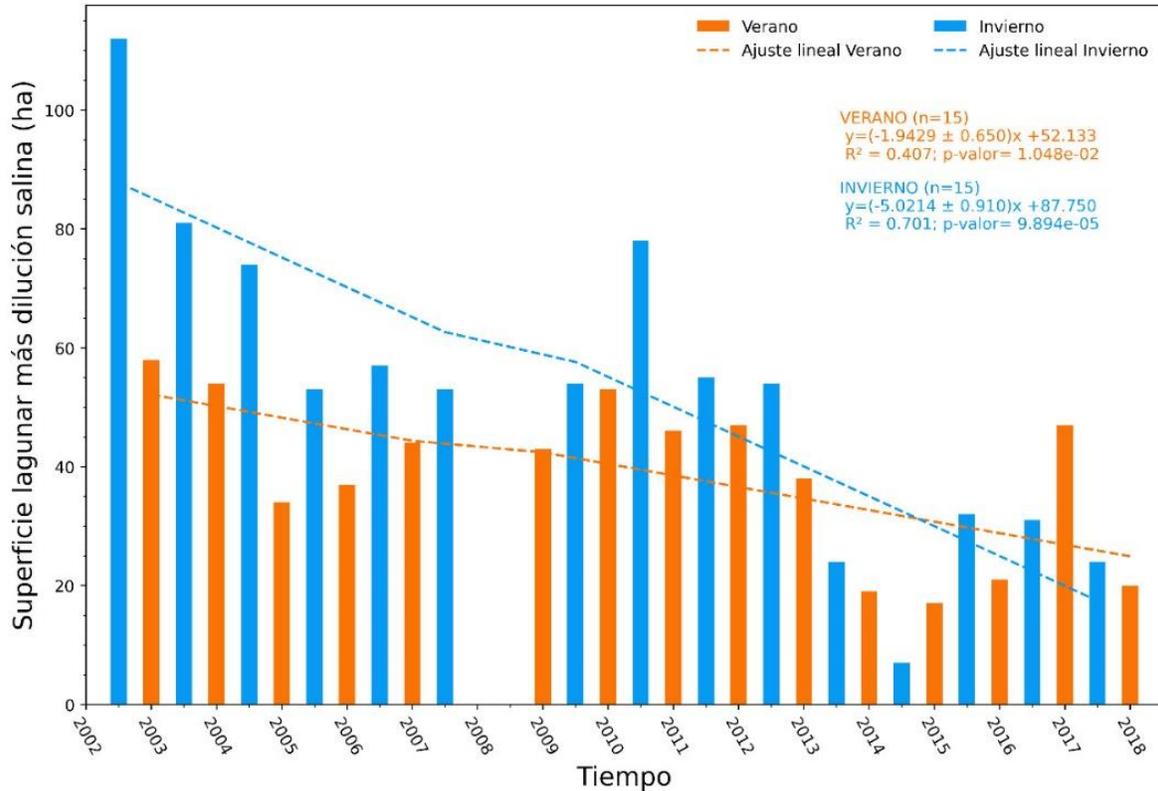


Figura 6-24). Desde 2013 a 2018 se registran valores de superficie menores a 40 ha, que contrasta con el período anterior 2002 a 2012, siendo el mínimo de 7 ha durante 2014. La curva de observaciones de verano presenta menos dispersión que invierno, observándose además valores menores a 22 ha, desde 2014 a 2016 y durante 2018, siendo el mínimo de 17 ha registrado durante 2015.

Durante el invierno de 2002 se observa la máxima areal de 112 ha, año donde las alzas se repiten tanto para superficies lagunares y de agua de dilución salina en la base de datos generada durante las 4 temporadas, lo que coincide con los eventos de precipitación durante julio 2002 de 8,5 mm en EM-Peine y de 17 mm en EM-SCL.

A modo de síntesis general, las superficies lagunares totales y profundas estimadas, de todas las temporadas, analizadas por separado desde 1985 a 2019, han disminuido significativamente según el análisis de series temporales (A, B y Figura 6-17 A y B). Las series temporales correspondientes a la estación de invierno presentan la mayor disminución, seguido por otoño. En estas estaciones, el cambio relativo porcentual fluctúa en un rango de -78,3% a -59,46% (Tabla 6-16). En cambio, las series temporales correspondientes a la estación de verano presentan una menor disminución, aunque igualmente significativo. Las series de primavera y verano presentan un el cambio relativo porcentual menor que los correspondientes al invierno y otoño, que fluctúan entre -53,09% a -51,53% (Tabla 6-16).

En relación a la superficie de agua de dilución salina estimada, se presenta una variabilidad sin correspondencia a un modelo lineal, cuya pendiente no presenta significancia estadística, de modo que no se puede afirmar alguna tendencia de aumento o disminución (Figura 6-23 A y B).

Finalmente, el registro de superficie lagunar profunda más dilución salina de Minera Escondida, de resolución temporal más reciente (2002 a 2018), presenta una disminución significativa para verano e invierno (

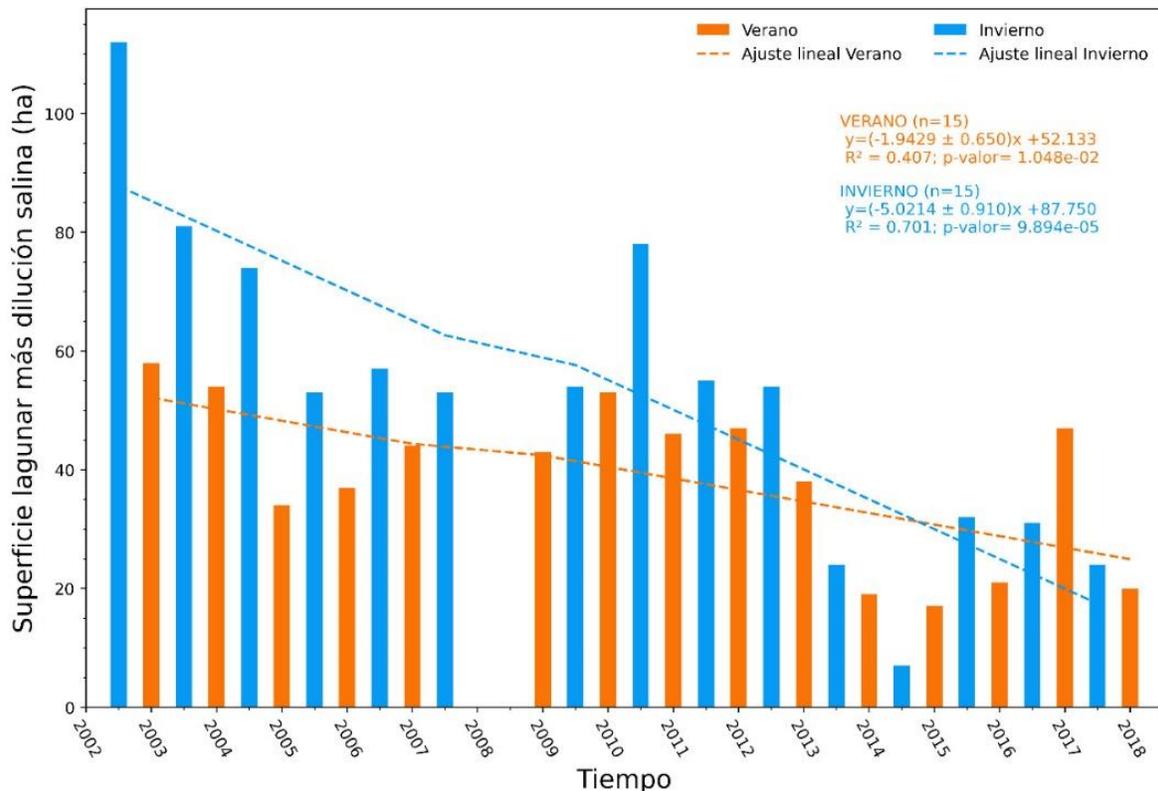


Figura 6-24).

### 6.2.1.5. Niveles freáticos

La información disponible de niveles freáticos corresponde a las mediciones que realizan las empresas Albemarle, Minera Escondida y SQM. En los alrededores de las lagunas existen actualmente barrenos y piezómetros, los que son medidos y reportados a la autoridad de manera periódica. Los puntos utilizados en este estudio corresponden a los que están ubicados en el área de influencia indirecta y que se pueden ver en la Figura 6-1. Se utilizó para este análisis información disponible mayormente desde el año 2013 y hasta el año 2019. En algunos casos fue posible obtener información de niveles de algunos puntos desde el año 2000.

El análisis de los niveles freáticos en los alrededores de la laguna no muestra un comportamiento o tendencia clara, ya que algunos pozos aumentan su nivel, otros mantienen un nivel estable y otros disminuyen su nivel. Las curvas de niveles freáticos se presentan agrupadas según los componentes espaciales definidos en Figura 6-1.

Se presentarán los valores promedio de niveles, desviación estándar, máximos y mínimos, ordenados por lagunas y su respectivo componente espacial. También se presenta el valor de cambio relativo, el que se determina de acuerdo con lo indicado en el punto 5.2.2.3 (Tabla 6-18). En la Figura 6-25 se destacan con asterisco (\*) los p-valor < 0,05.

Tabla 6-18 Cambio relativo de niveles freáticos

Laguna	Componente espacial	Inicio	fin	Piezómetro	Cambio relativo (m)
La Brava	Borde	4-2013	10-2019	BA-05	-0,013
		1-2007	10-2018	TPZ-13C	0,059
	Sur	4-2013	10-2019	BA-04	-0,041
		4-2013	10-2019	BA-16	-0,026
		7-2013	10-2019	BA-25	-0,011
		1-2015	1-2019	L12-3	0,012
	Sur lejano	10-2013	10-2019	MP-03A	-0,155
		1-2000	7-2018	TPZ-10	-0,072
La Punta	Borde	4-2013	10-2019	BA-07	-0,048
		7-2013	10-2019	BA-13	-0,044
		4-2013	10-2019	BA-14	0,051
		4-2013	10-2019	BA-15	-0,013
	Sur	4-2013	10-2019	BA-08	-0,031
		10-2013	10-2019	MP-01A	-0,029
		10-2013	10-2019	MP-01B	0,081
	Sur lejano	1-2015	4-2019	L12-2	-0,008

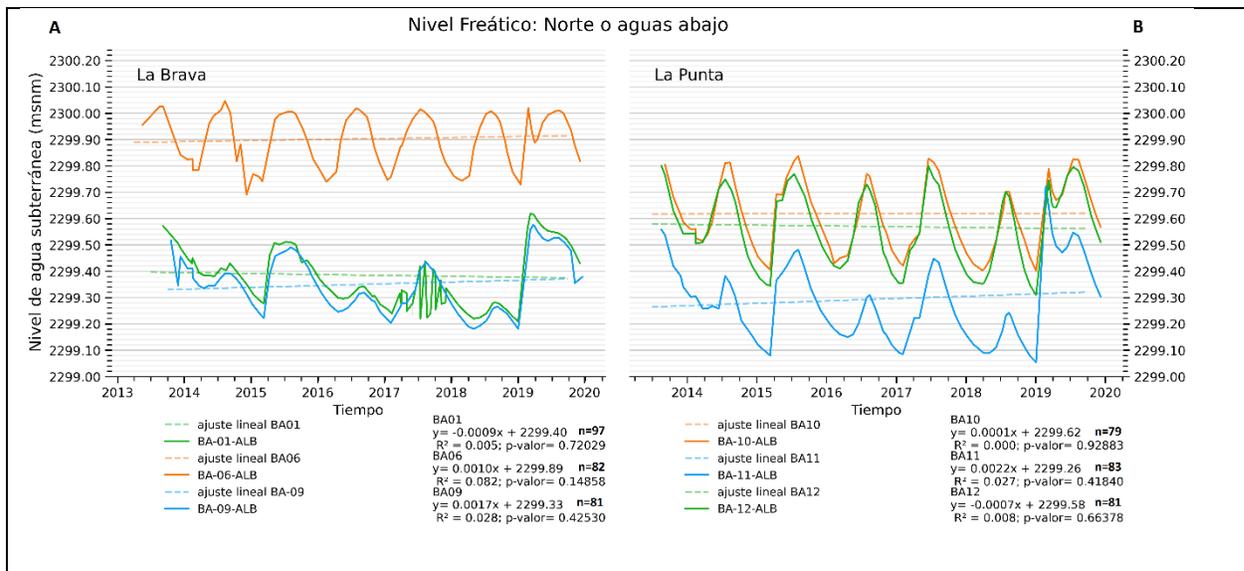
Fuente: Elaboración propia

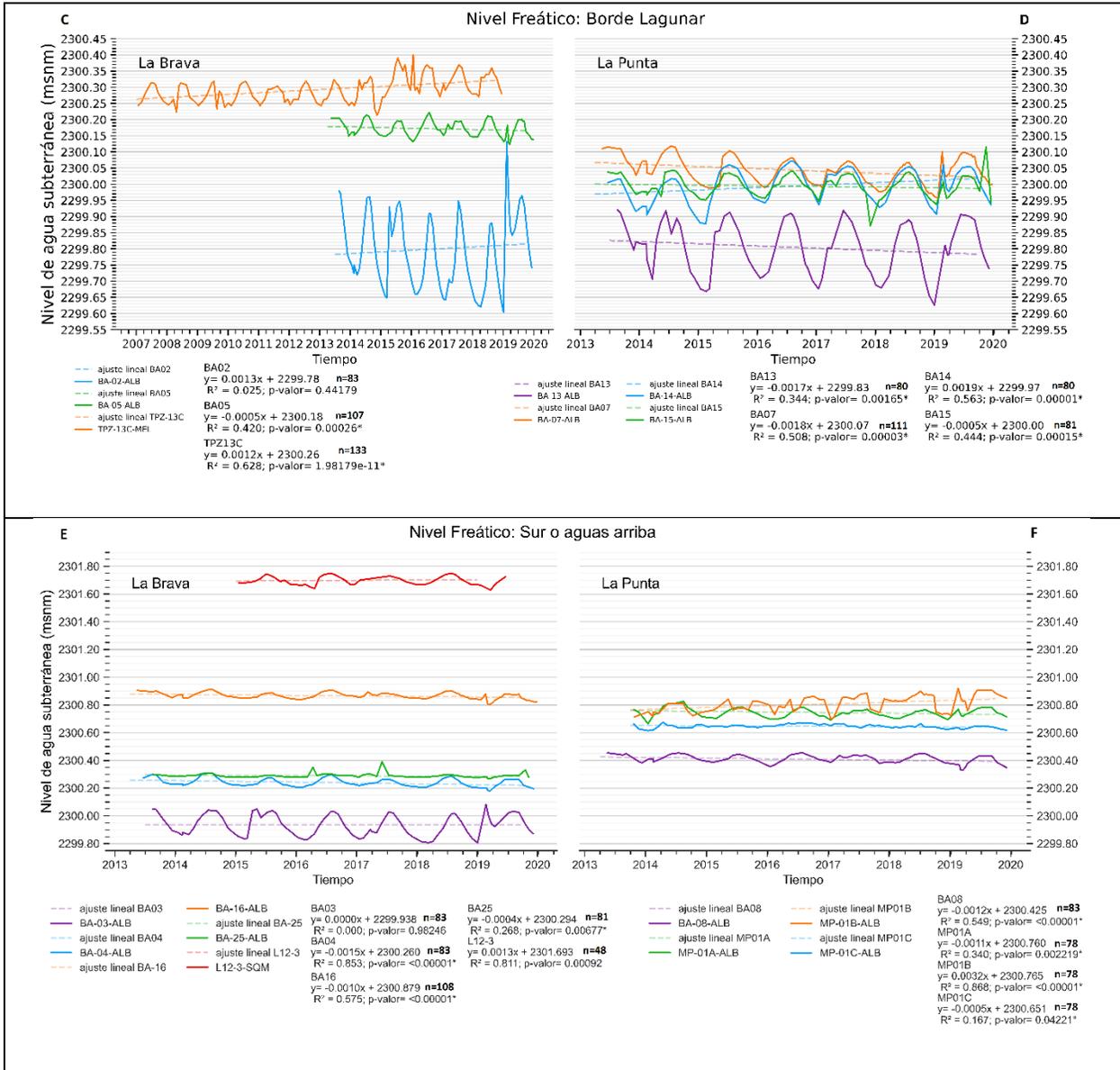
Tabla 6-19 Descripción estadística de niveles freáticos

Laguna	Componente espacial	Piezómetro	SD (m)	Promedio (msnm)	Máxima (msnm)	Mínima (msnm)	N observaciones
--------	---------------------	------------	--------	-----------------	---------------	---------------	-----------------

La Brava	Norte	BA-01	0,113	2.299,365	2.299,618	2.299,209	97
		BA-06	0,099	2.299,900	2.300,047	2.299,691	82
		BA-09	0,108	2.299,349	2.299,576	2.299,181	81
	Borde	BA-02	0,115	2.299,796	2.300,131	2.299,604	83
		BA-05	0,024	2.300,173	2.300,222	2.300,123	107
		TPZ-13C	0,039	2.300,291	2.300,400	2.300,213	133
	Sur	BA-03	0,076	2.299,936	2.300,082	2.299,806	83
		BA-04	0,030	2.300,240	2.300,307	2.300,180	83
		BA-16	0,024	2.300,866	2.300,913	2.300,802	108
		BA-25	0,016	2.300,290	2.300,390	2.300,268	81
	Sur lejano	L12-3	0,032	2.301,695	2.301,750	2.301,628	48
		MP-03A	0,082	2.301,920	2.302,113	2.301,736	79
TPZ-10		0,059	2.301,756	2.301,940	2.301,620	329	
TPZ-7B		0,048	2.302,330	2.302,430	2.302,080	209	
La Punta	Norte	BA-10	0,130	2.299,612	2.299,837	2.299,402	79
		BA-11	0,152	2.299,287	2.299,723	2.299,054	83
<b>Laguna</b>	<b>Componente espacial</b>	<b>Piezómetro</b>	<b>SD</b>	<b>Promedio (msnm)</b>	<b>Máxima (msnm)</b>	<b>Mínima (msnm)</b>	<b>N observaciones</b>
La Punta	Borde	BA-12	0,139	2299,566	2299,800	2299,310	81
		BA-07	0,040	2300,043	2300,118	2299,957	111
		BA-13	0,079	2299,804	2299,920	2299,626	80
		BA-14	0,051	2299,995	2300,072	2299,877	80
	Sur	BA-15	0,035	2299,995	2300,115	2299,871	81
		BA-08	0,030	2300,411	2300,456	2300,329	83
		MP-01A	0,032	2300,744	2300,826	2300,665	78
		MP-01B	0,058	2300,811	2300,920	2300,698	78
	Sur lejano	MP-01C	0,013	2300,645	2300,675	2300,615	78
		L12-2	0,031	2302,543	2302,600	2302,490	52

Fuente: Elaboración propia





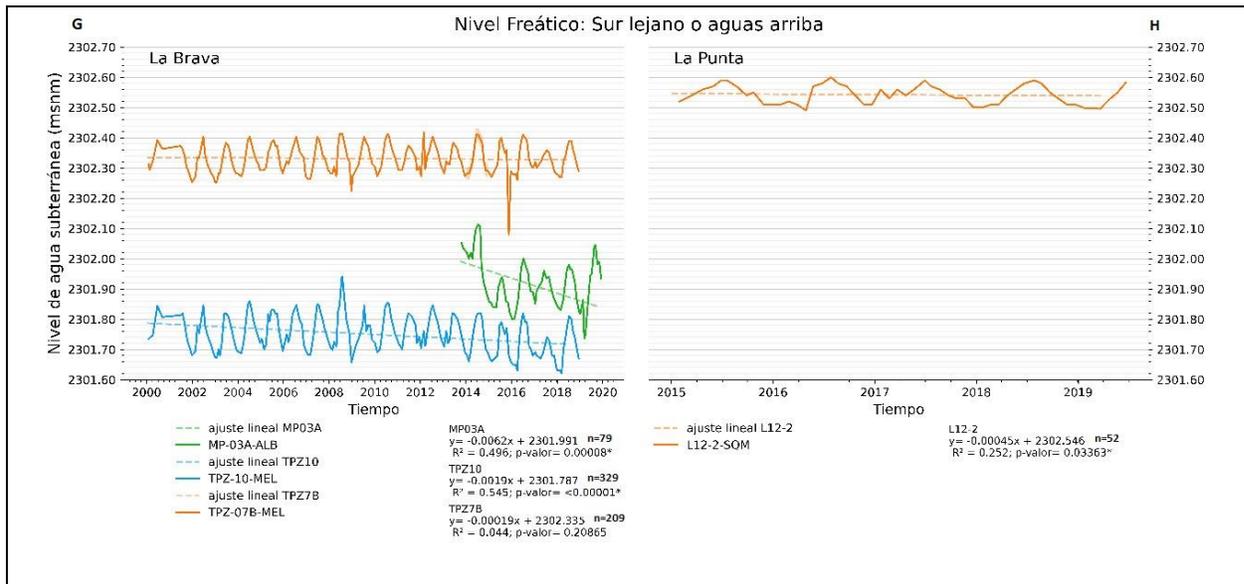


Figura 6-25 Niveles freáticos: (A, B) Norte o aguas abajo, (C, D) Borde lagunar, Sur o aguas arriba, (E, F) Sur lejano (G, H). Fuente: Elaboración propia

Los niveles freáticos presentan comportamiento diferenciado por componente espacial y laguna, los que se describen a continuación. El análisis de variación de niveles en los pozos y barrenos ha mostrado que el mayor descenso total es de -0,155 m durante el periodo 2013 a 2019 y el mayor ascenso total es de +0,081 m durante el periodo 2000 a 2018. Es por esta razón que se ha propuesto una definición para determinar si los cambios de niveles freáticos son “altos” o “leves”. Se dirá que los cambios de niveles son “leves” cuando el cambio total de nivel durante los periodos analizados se mueva en un rango de  $\pm 0,005$  m a  $\pm 0,07$  m. Por otra parte, se considera que el cambio total de nivel es alto cuando es superior a  $\pm 0,07$  m durante los periodos analizados.

Comenzando la descripción de resultados con los niveles freáticos de los puntos ubicados aguas abajo de las lagunas (BA-01, BA-06, BA-09, BA-10, BA-11 y BA-12;

A y B), se aprecia que las mediciones oscilan constantemente, aumentando en invierno y disminuyendo en verano, excepto para BA-01 y BA-09, en los que se registró el máximo aumento de nivel durante otoño 2019. En relación a la dispersión de los datos, ésta es en general alta (SD promedio = 0,124 m; SD máximo = 0,152 m), mostrando una dispersión mayor en los puntos ubicados en la cercanía de Laguna La Punta (SD promedio La Brava = 0,107 m; SD promedio La Punta = 0,140 m; Tabla 6-15). Además, durante verano 2019 todos los niveles de este componente espacial registran un incremento pronunciado.

Los niveles freáticos medidos por los barrenos BA-10, BA-11 y BA-12, localizados en el componente espacial norte o aguas abajo de Laguna La Punta muestran una disminución del nivel freático para verano y otoño, en cambio, aumentan en invierno y primavera. Las alzas y descensos son irregulares y dispersos para este

componente espacial. Se destaca que para el barreno BA-11 se ha observado el nivel histórico más bajo en el verano de 2019 (

B). Los barrenos aguas abajo se localizan sobre suelo salino, sin embargo, ocasionalmente BA-10 y BA-12 están dentro de la extensión del espejo de agua superficial y esporádico de Laguna La Punta (

B) mientras que el barreno BA-11 queda siempre fuera del límite del espejo de agua de las lagunas (Figura 6-1).

Al realizar el análisis de series temporales a los registros correspondientes al período 2013 a 2019 se evidencia que los niveles freáticos ubicados aguas abajo de las lagunas, localizados a menor altitud y hacia el noroeste de las lagunas La Brava y La Punta (BA-01, BA-06, BA-09, BA-10, BA-11 y BA-12;

A y B), no presentan en ningún caso un coeficiente de determinación mayor a 0,10. Esto, a pesar de realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a la curva de tendencia obtenida desde la descomposición de las series (depurada de oscilaciones estacionales), lo que indica que no hay una correspondencia de las series con un modelo lineal, de modo que no se puede afirmar una tendencia de aumento o disminución significativo al largo del todo el período con respaldo estadístico (ver resultados de los ajustes lineales en Figura 6-25 A).

Ahora analizando los puntos de medición ubicados en el componente espacial correspondiente al borde de las lagunas (BA-02, BA-05, BA-15, TPZ-13C, BA-07, BA-13 y BA-14; Figura 2-25 C y D), se observa que los valores y oscilaciones de los niveles de BA-07, BA-14 y BA-15 (Laguna La Punta) coevolucionan con estrecha sincronía (Figura 6-25 D). No obstante, se aprecia que a lo largo del período medido (2013 a 2019), los valores de estos tres barrenos han llegado a converger hacia el presente. Entre estos tres barrenos, el valor máximo fue medido en BA-07 durante el invierno de 2014 (2300,118 msnm) y el mínimo en BA-15 durante el verano de 2018 (2299,871 msnm). Por otro lado, las mediciones realizadas en BA-13 presenta una mayor dispersión (SD = 0,079 m) que los tres barrenos anteriores (rango SD BA-07, BA-14 y BA-15 es de 0,051 m a 0,035 m;

Tabla 6-19), y cuyos valores están todos por debajo de los otros tres barrenos de Laguna La Punta. El valor mínimo medido en BA-13 es el valor más bajo de los puntos ubicados en el componente espacial borde de Laguna La Punta (2299,626 msnm).

Continuando con el análisis de series temporales para los puntos ubicados en el componente espacial borde de La Punta, con las mediciones realizadas entre 2013 y 2019 se encontró que las regresiones lineales aplicadas a las curvas de tendencia de las series de los niveles freáticos de los barrenos BA-13 (pendiente = -

0,0068 m/año;  $r^2=0,344$ ; Wtest p-valor < 0,05), BA-15 (pendiente = -0,0010 m/año;  $r^2=0,444$ ; Wtest p-valor < 0,001) y BA-07 (pendiente = -0,0072 m/año;  $r^2=0,508$ ; Wtest p-valor < 0,001) presentan una tendencia de disminución significativa, con considerable correspondencia a un modelo lineal, mientras que la serie de BA-14 (pendiente = 0,0076 m/año;  $r^2=0,563$ , p-valor < 0,001) evidencia una tendencia de aumento significativo ( D).

En relación al componente espacial borde de Laguna La Brava, al realizar una regresión lineal con una serie de mayor extensión temporal, desde 2007 a 2018, se obtiene que la serie de TPZ-13C presenta una tendencia de aumento significativo (pendiente = 0,0048 m/año;  $r^2= 0,628$ , p-valor < 0,001). Se registra una concentración de valores relativamente más altos desde 2015 a 2019 (

C). Este piezómetro registra un incremento total de +0,081 m para el período analizado (Tabla 6-18).

Los otros dos puntos de medición ubicados en el componente borde de La Brava presentan registros desde invierno de 2013 hasta primavera de 2019. El ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) se aplicó a la serie del barreno BA-05 y se evidencia una disminución significativa. En tanto, al analizar la serie de BA-02 se evidencia que presenta un coeficiente de determinación inferior a 0,10 por lo que no hay correspondencia a un modelo lineal y no se puede afirmar una tendencia de aumento o disminución con respaldo estadístico. Esto se podría deber a la dispersión relativamente alta presentada en esta serie (SD = 0,115 m). Se destaca un agudo valor máximo durante verano de 2019.

Ahora con la atención en los puntos de medición de niveles freáticos ubicados en el componente espacial sur o aguas arriba, se dispone de registros entre 2013 y 2019 para BA-03, BA-04, BA-16, BA-25, y entre 2015 y 2019 para L12-3 (Figura 6-25 E y F). Tanto Laguna La Brava como La Punta presentan series estables de dispersión baja (SD promedio = 0,035 m; Tabla 6-19).

Al aplicar un ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a las curvas de tendencias de las series correspondientes al componte sur, se evidenció que la mayoría de las series de mediciones de niveles freáticos presentan una tendencia de disminución significativa, tanto en Laguna La Brava (BA-04 pendiente = -0,006 m/año;  $r^2=0,853$ ; Wtest p-valor < 0,001; BA-16 pendiente = -0,004 m/año;  $r^2=0,575$ ; Wtest p-valor < 0,001; BA-25 pendiente = -0,0016 m/año;  $r^2 = 0,268$ ; Wtest p-valor=0,007), como en Laguna La Punta (BA-08 pendiente = -0,0048 m/año;  $r^2 =0,549$ ; Wtest p-valor < 0,001; MP-01A pendiente = -0,0044 m/año;  $r^2 = 0,340$ ; Wtest p-valor < 0,05; MP-01C pendiente = -0,001 m/año;  $r^2=0,167$ ; Wtest p-valor < 0,05). Algunas series presentan una tendencia de aumento significativo como es el caso de las mediciones realizadas con los piezómetros L12-3 en

Laguna La Brava (pendiente = 0,0052 m/año;  $r^2=0,811$ ; Wtest p-valor < 0,001) y MP-01B en Laguna La Punta (pendiente = 0,0128 m/año;  $r^2$  de 0,868; Wtest p-valor < 0,001). Los cambios relativos son leves (Tabla 6-18 y Tabla 6-19), excepto para MP-01B (La Punta) en el que la variación es de +0,081 m de aumento total para el período analizado.

Finalmente, los puntos de medición de niveles freáticos localizados en el componente espacial “sur lejano” (MP-03A, TPZ-10, TPZ-07B y L12-2), se analizaron del mismo modo. En el caso de los puntos de medición en Laguna La Brava se evidencia una tendencia de disminución significativa para dos de las tres series de mediciones, de acuerdo a la regresión lineal. Estos son TPZ-10 (pendiente = -0,0076 m/año;  $r^2=0,545$ ; Wtest p-valor < 0,001; años 2000-2018) y MP-03A (pendiente = -0,0248 m/año;  $r^2=0,496$ ; Wtest p-valor < 0,001; años 2014-2019), excluyendo a la serie de TPZ-07B cuyo ajuste lineal presenta un coeficiente de determinación inferior a 0,10. Las mediciones de MP-03A registran una disminución total de nivel de -0,155 m en el período señalado. El comportamiento de los niveles en el piezómetro MP-03A es irregular, en cambio para TPZ-7B el comportamiento es regular, excepto por una mínima anómala que se escapa de la tendencia general durante el verano de 2016.

Para este componente espacial, sur lejano, solo hay un punto de medición ubicado en la cercanía de Laguna La Punta. Éste es el piezómetro L12-2, que dispone de mediciones desde 2015 a 2019. El ajuste lineal aplicado a curva de tendencia de su serie de tiempo evidencia una tendencia de disminución significativa (pendiente = -0,0016 m/año;  $r^2= 0,252$ ; Wtest p-valor < 0,05), cuya disminución total se considera leve (-0,008 m;

G, H).

Como síntesis general, la mayoría de los cambios relativos de los niveles son leves, estando en un rango absoluto entre 0,005 a 0,07 m, los que se estimaron para los componentes espaciales “borde lagunas” y “sur” de ambas lagunas. Al compararlos, se obtiene que solo cuatro varían positivamente desde 2013 a 2019 y uno desde 2007 a 2018. En cambio, los cambios relativos de disminución leve se registran en diez piezómetros, exceptuando los localizados en el componente espacial “sur lejano” de la Brava, que registran una mayor disminución total de -0,155 m desde 2013 a 2019 y de -0,072 m, desde 2000 a 2018 (Tabla 6-18). En tanto, las series de las mediciones de los piezómetros localizados en el componente espacial “aguas abajo” de ambas

lagunas, no presentan correspondencia a un modelo lineal por lo que no se puede afirmar un cambio significativo para los períodos analizados.

A continuación, se presentan los niveles medidos en los barrenos BA-05, BA-07 y BA-16 (Tabla 6-20 y

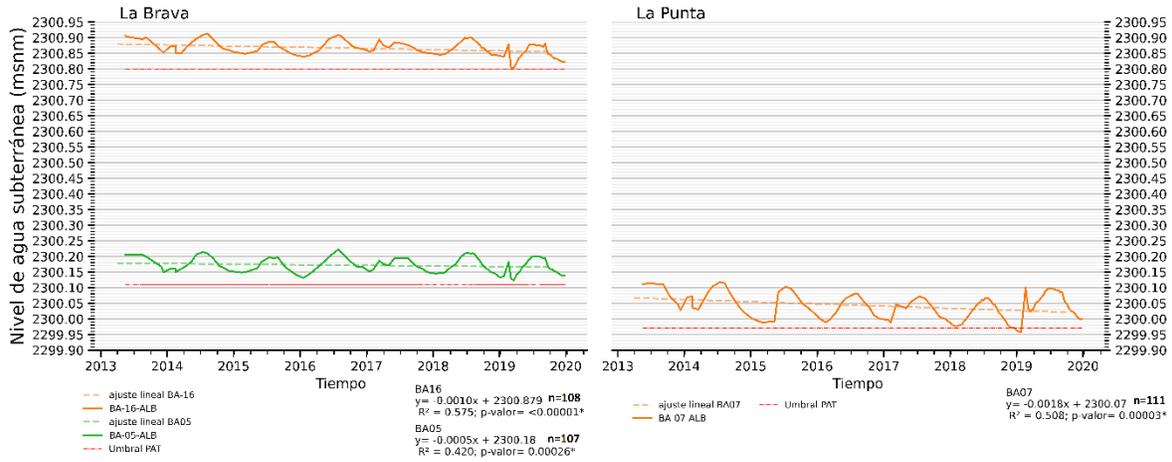


Figura 6-26) que pertenecen al Plan de Alerta Temprana de la empresa Albemarle.

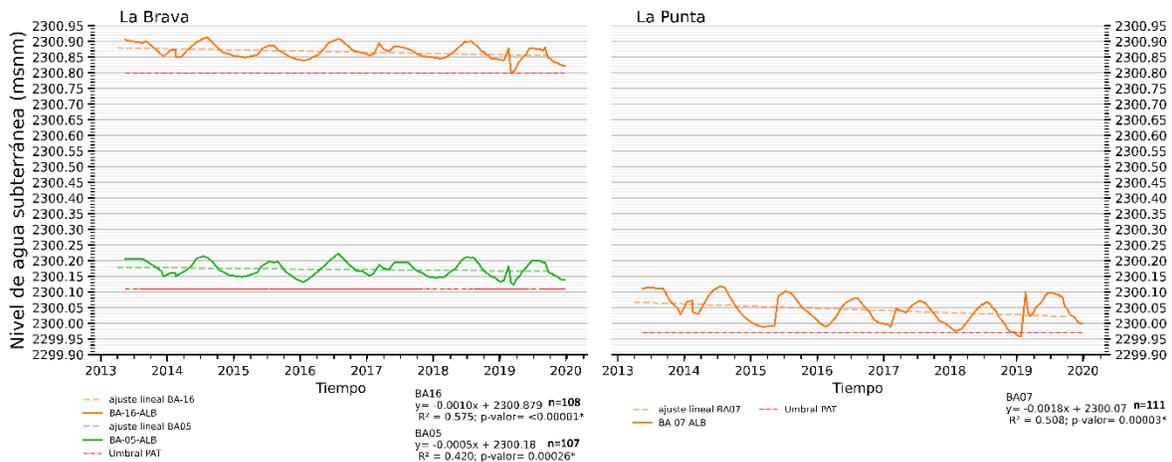


Figura 6-26 Piezómetros del Plan de Alerta Temprana, 2013 a 2019

Fuente: Elaboración propia

En

la

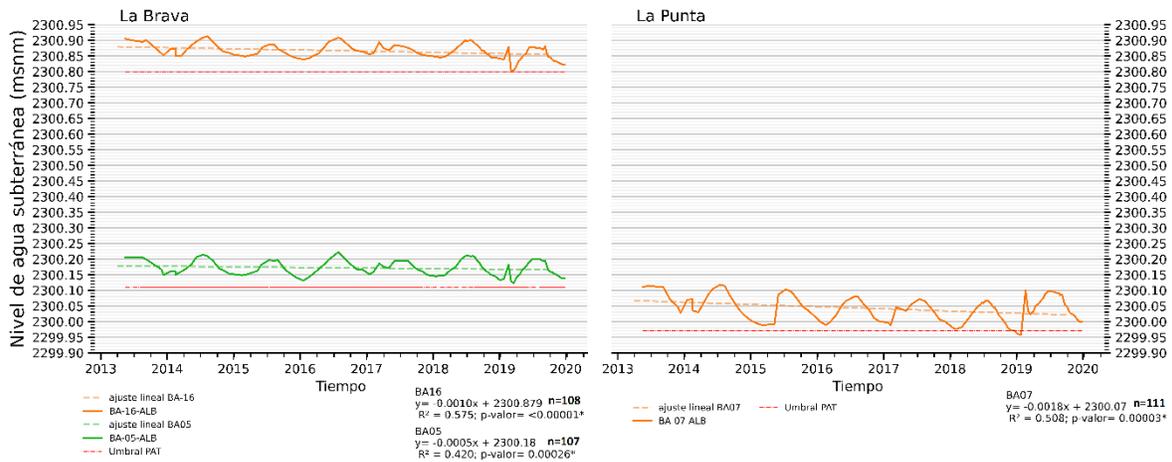


Figura 6-26 se observan las series de tiempo de las mediciones de niveles freáticos de los piezómetros que están en el Plan de alerta temprana de Albemarle, durante el período 2013 a 2019. El umbral de activación para barreno BA-07 fue superado el 5 y 26 de enero de 2019, registrándose una medición de 2.299,961 msnm y 2.299,957 msnm, respectivamente. El umbral de activación para el barreno BA-16 estuvo a 0,2 mm de alcanzarse. La medición de nivel freático más cercano al umbral para el barreno BA-05 es de 2.300,123 msnm, medido el 19 de marzo de 2019.

Tabla 6-20 Umbrales de niveles freáticos, Plan de Alerta Temprana

Barreno	Umbral PAT
BA-16	2.300,80 msnm
BA-07	2.299,97 msnm
BA-05	2.300,11 msnm

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.1.6. Niveles lagunares

Los niveles lagunares reportados por Minera Escondida en las regillas ubicadas en las lagunas La Punta y La Brava, se trabajaron con la información disponible a partir del año 1995 hasta el año 2018. Por otra parte, la empresa Albemarle cuenta con información de niveles lagunares de sus limnímetros instalados en las lagunas La Punta y La Brava, desde el año 2013 y hasta el año 2019. Los niveles registrados por ambas empresas son de frecuencia mensual. Se realizó una descripción estadística, obteniendo promedios, mínimas, máximas y la

desviación estándar de los niveles lagunares (Tabla 6-21). Luego, la curva de tendencia obtenida a partir de cada serie de mediciones de los niveles lagunares se sometieron a una regresión lineal de mínimos cuadrados durante los períodos señalados.

Se presenta en la

Tabla 6-22 el cambio relativo, calculado como fue detallado en 5.2.2.3. En los gráficos se destacan con asterisco (\*) los p- valor menor a 0,05.

Tabla 6-21 Descripción estadística de niveles lagunares de La Punta y La Brava

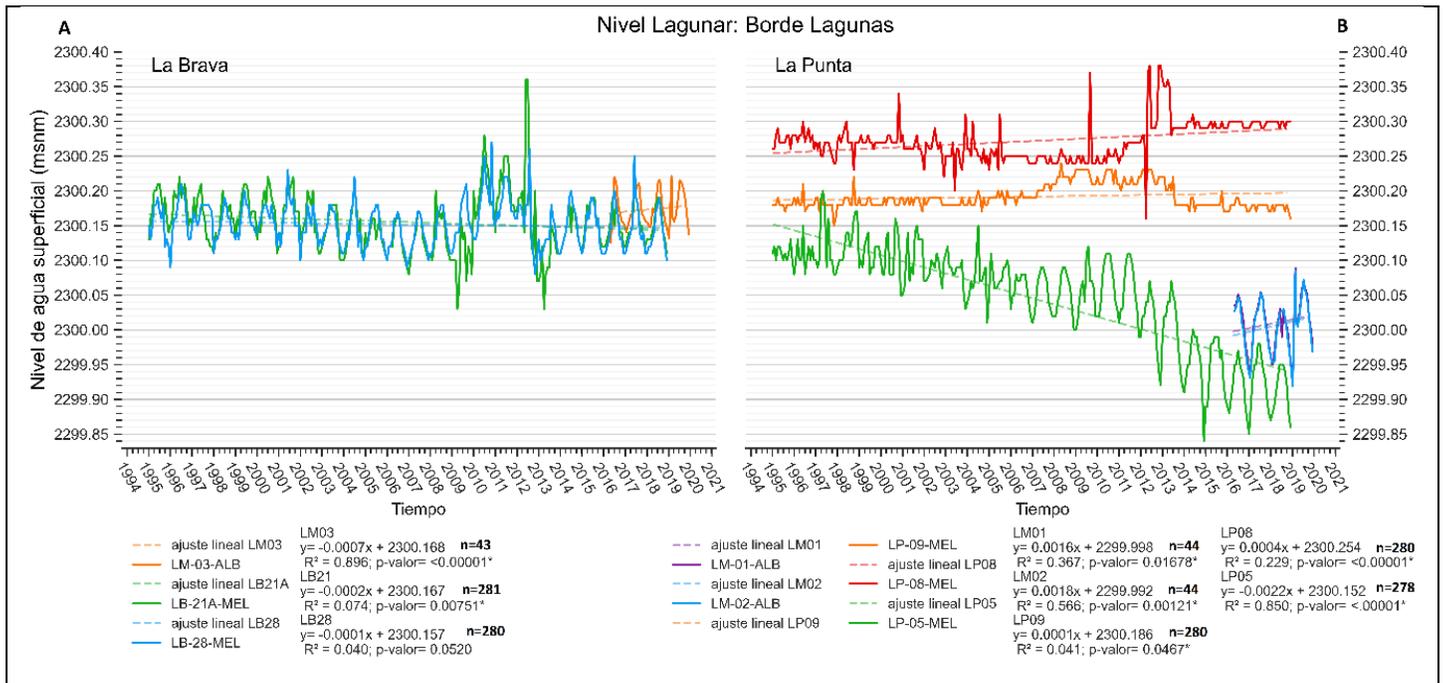
Laguna	Componente espacial	Reglillas y limnímetros	SD (m)	Promedio (msnm)	Máxima (msnm)	Mínima (msnm)	N observaciones
La Brava	Borde	LB-21 (A)	0,043	2.300,155	2.300,36	2.300,030	281
		LB-28 (B)	0,032	2.300,152	2.300,27	2.300,080	280
		LM-03	0,026	2.300,175	2.300,221	2.300,126	43
	Sur	LB-26 (C)	0,020	2.300,145	2.300,28	2.300,110	280
		LM-04	0,036	2.300,145	2.300,227	2.300,029	43
La Punta	Borde	LM-01	0,037	2.300,010	2.300,089	2.299,931	44
		LM-02	0,038	2.300,006	2.300,085	2.299,919	44
		LP- 05 (F)	0,074	2.300,047	2.300,200	2.299,840	278
		LP-08 (E)	0,029	2.300,272	2.300,380	2.300,160	280
		LP-09 (D)	0,017	2.300,192	2.300,240	2.300,150	280

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-22 Cambio relativo de niveles lagunares

Laguna	Componente espacial	Inicio	Fin	Reglillas y limnímetros	Cambio relativo (m)
La Brava	Borde	4-2016	10-2019	LM-03	0,011
	Sur	1-1995	10-2018	LB-26	-0,030
		4-2016	10-2019	LM-04	0,019
La Punta	Borde	4-2016	10-2019	LM-01	0,024
				LM-02	0,028
		1-1995	10-2018	LP-05	-0,213
				LP-08	0,035

Fuente: Elaboración propia



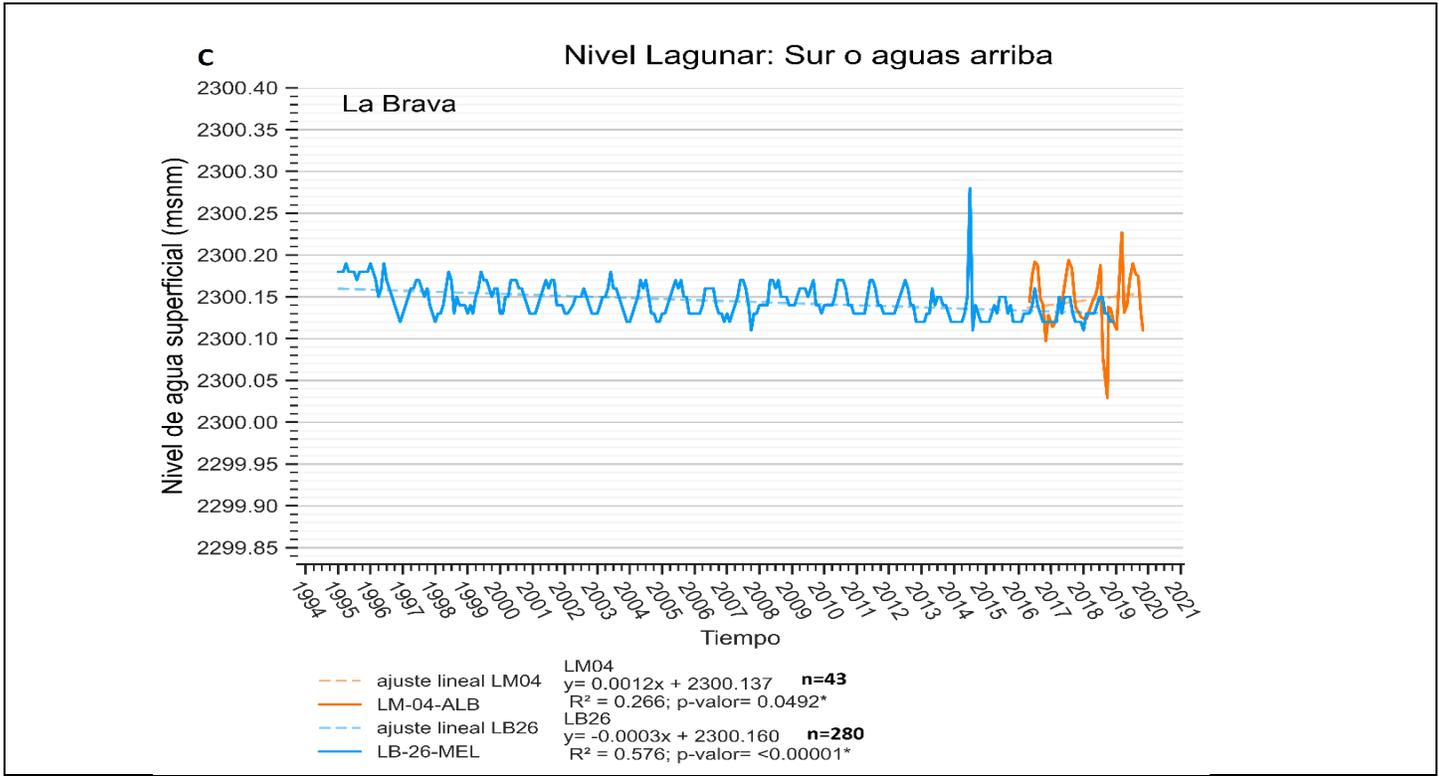


Figura 6-27 Niveles lagunares: (A, B) Borde y (C) Sur o aguas arriba

Fuente: Elaboración propia

Las series de tiempo de las mediciones disponibles para el componente espacial correspondiente al borde de las lagunas están ilustradas en Figura 6-27 A y B. Este componente espacial está representado por los puntos de medición LM-21 (A), LB-28 (B), LM-03, LM-01, LM-02, LP-05 (F), LP-08 (E) y LP-09 (D). Al examinar las series que corresponden a Laguna La Brava (

Figura 6-27 A), se destaca que durante los años 2010 a 2013 se registró un ascenso unimodal de valores relativamente altos con fluctuaciones estacionales. En la primavera de 2012 se registró el valor de nivel máximo medido por LB-21 (A) (2300,36 msnm). En tanto, se registra el valor máximo para Laguna La Punta durante otoño 2013 medido por LP-08 (E) (2300,380 msnm) y la mínima durante el verano de 2015 medido por LP-09 (D) (2300,150 msnm;

B y Tabla 6-21). LP-08 registró a partir de 2012 un ascenso de nivel que se mantiene hasta el presente, cuyos valores están por sobre los registrados entre 1995 y 2012. Esto se contrapone al registro medido en LP-05 que muestra un sostenido descenso de nivel a lo largo de la totalidad de la serie disponible (1995-2018), y exacerbado luego de 2014.

Al realizar un análisis de series temporales con las curvas de tendencias de las series de mediciones de niveles lagunares (Figura 6-27 A y B), se evidencia que de los tres puntos de medición ubicados en el componente borde de Laguna La Brava (Figura 2-27 A), solo la serie de LM-03 presenta correspondencia a un modelo lineal, donde se pudo determinar una tendencia de aumento significativo, cuya pendiente es de  $+0,0028$  m/año ( $r^2 = 0,896$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ). Esta serie, sin embargo, solo cuenta con mediciones desde 2016 hasta 2019. Los ajustes lineales aplicados a las series obtenidas a partir de las reglillas LB-21 (A) y LB-28 (B), en La Brava, que cuentan con registros de mayor extensión temporal (desde 1995 hasta 2018), presentan coeficientes de determinación menores a 0,10, por lo que no se puede determinar una tendencia de aumento o disminución con respaldo estadístico.

En tanto, las series disponibles desde puntos de medición ubicados en el componente borde de Laguna La Punta muestran una mayor complejidad al encontrar tendencias divergentes entre puntos. Las reglillas LP-05, LP-08 y LP-09 cuentan con mediciones desde 1995 hasta 2018. De éstas, el ajuste lineal aplicado a la curva de tendencia de la serie de LP-08 evidencia un de aumento significativo (pendiente =  $0,0016$  m/año;  $r^2=0,229$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ), la serie de LP-05 muestra una tendencia de disminución significativa (pendiente =  $-0,0088$  m/año;  $r^2 = 0,850$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ) y la serie de LP-09 presenta un coeficiente de determinación menor a 0,10, por lo que no se puede determinar una tendencia de aumento o disminución para esta última reglilla (Figura 6-27 B).

Para este mismo componente (borde de Laguna La Punta), se dispone de mediciones tomadas de los limnómetros LM-01 y LM-02 entre 2016 a 2019. El ajuste lineal aplicado a la curva de tendencia de las series de estos puntos evidencia un aumento significativo de nivel (LM-02 pendiente =  $0,0072$  m/año;  $r^2=0,566$ ; Wtest p-valor  $< 0,05$ ; LM-01 pendiente =  $0,0064$  m/año;  $r^2=0,367$ ; Wtest p-valor  $< 0,05$ ;

Tabla 6-22).

En relación al comportamiento de los niveles aguas abajo de las lagunas (

C), se presentan dos puntos de monitoreo, LM-04 y LB-26. La reglilla LB-26 cuenta con mediciones desde los años 1995 a 2018, donde se destaca un valor sobresaliente durante invierno 2014. La profundidad de la columna de agua en LB-26 está en un rango de 0,001 a 0,080 m. Al aplicar un ajuste lineal a la curva de tendencia de la serie de LB-26, se observa una tendencia de disminución significativa con una pendiente de -0,0012 m/año ( $r^2=0,576$ ; Wtest p-valor < 0,001). En tanto, el limnómetro LM-04 cuenta con mediciones entre los años 2016 a 2019, donde se destaca un valor bajo durante primavera de 2018. Al aplicar un ajuste lineal a la curva de tendencia de la serie de LM-04, se observa una tendencia de aumento significativo con una pendiente de 0,0048 m/año ( $r^2=0,266$ ; Wtest p-valor < 0,05).

En la Tabla 6-21 se muestran los promedios de los niveles lagunares de los puntos de monitoreo ubicados en las lagunas La Punta y La Brava. Se registran los mayores valores de niveles promedio dentro del cuerpo de La Brava y en el extremo distal nororiente de La Punta. Al realizar una comparación histórica, entre las columnas de agua, se obtiene que desde el año 1998 a 2018 la profundidad de columna de agua de los niveles lagunares es mayor para Laguna La Punta que la Brava (MW test p-valor < 0,001).

Con respecto a la altitud geográfica, las reglillas localizadas en el borde oeste y dentro de las lagunas, están a una altitud menor, aproximadamente un metro por debajo de las localizadas en el borde oriente de las lagunas (Figura 6-2).

Los cambios relativos obtenidos, que se basan en ajustes lineales con correspondencia lineal considerable y pendientes significativamente distintas a cero, resultan para Laguna La Brava que entre 2016 a 2019 hay evidencia de una variación de aumento leve (LM-03: +0,011 m), y en Laguna La Punta se observa igualmente una variación de aumento para el mismo período histórico (LM-01: +0,024 m; LM-02: +0,028 m).

Luego, los cambios relativos de los niveles lagunares para el período de 1995 a 2018 evidencia una variación significativa tanto negativa como positiva en el borde de Laguna La Punta (LP-05: -0,213 m; LP-08: +0,035 m;

Tabla 6-22). Ambas reglillas están situadas a 600 metros de distancia en una recta diagonal inclinada.

#### **6.2.1.7. Conductividad Eléctrica**

Los valores de conductividad eléctrica medida en las lagunas y reportados por Minera Escondida están disponibles desde el año 1998 hasta el año 2018, durante los meses de enero, abril, julio y octubre. Por otra parte, la empresa Albemarle también mide conductividad eléctrica del agua de las lagunas en los puntos en que se ubican sus limnímetros y en sus piezómetros, como por ejemplo en MP-01C donde se realiza medición de la conductividad del agua ubicada a una profundidad de entre 0,3 a 0,9 m, desde 2013 a 2019, con una frecuencia de medición mensual.

Se presentan los valores promedio, desviación estándar, máximos y mínimos de los conjuntos de datos, ordenados por lagunas y su respectivo componente espacial (

Tabla 6-23).

El cambio relativo presentado en la Tabla 6-24, es calculado como fue detallado en 5.2.2.3. En los gráficos se destacan con asterisco (\*) los p-valor < 0,05.

Tabla 6-23 ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Tabla 6-24 Cambio relativo de conductividad eléctrica

Laguna	Componente espacial	Inicio	Fin	Punto de muestreo	Cambio relativo ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
La Brava	Borde	1-1998	7-2018	LB28	-18.928,70
	Sur lejano	10-2013	10-2019	MP03A	1.010,81
La Punta	Borde	4-2016	10-2019	LM01	19.813,08
				LM02	15.818,63
		1-1998	7-2018	LP05	-12.345,44

Fuente: Elaboración propia

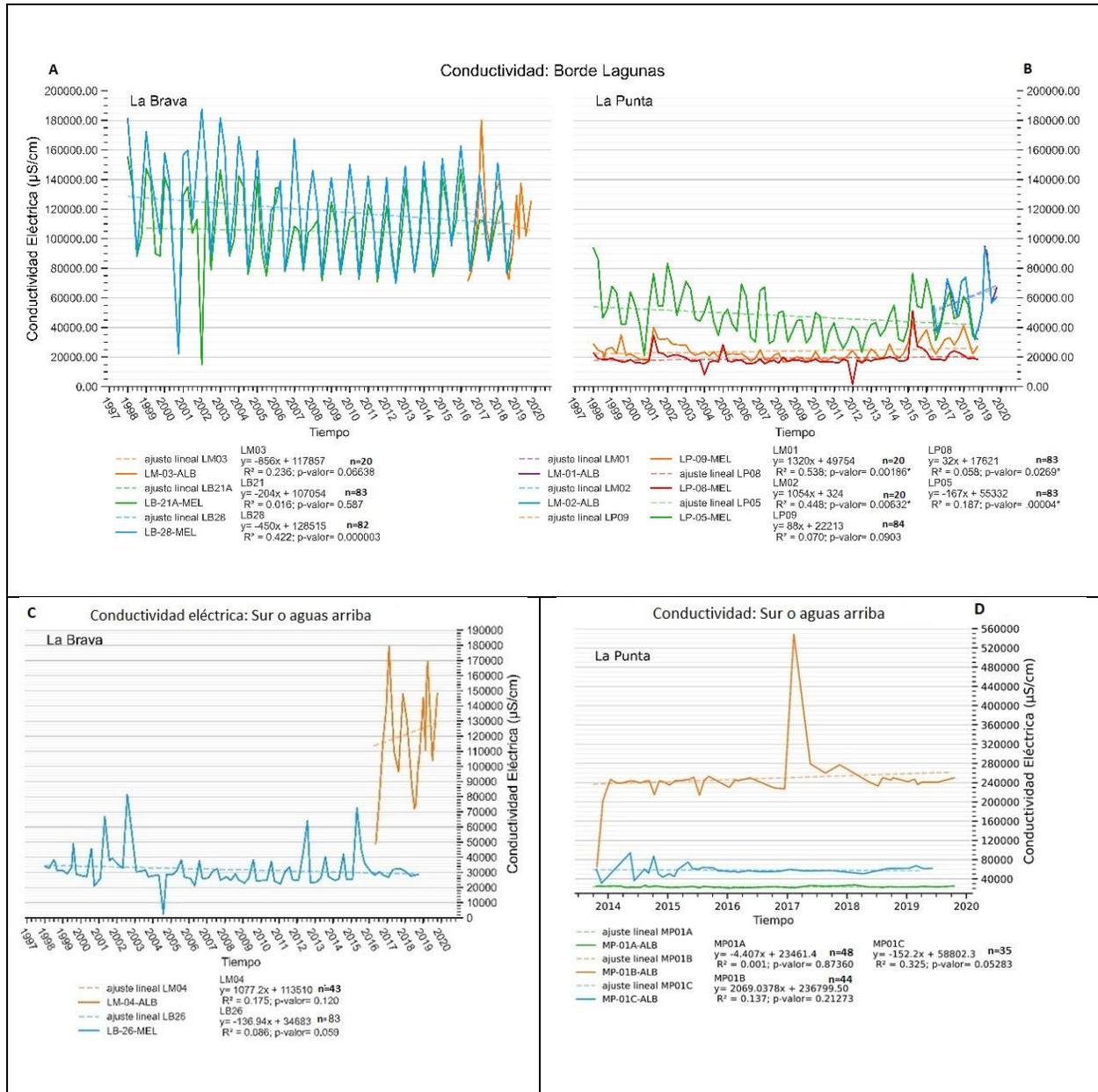


Figura 6-28 Conductividad eléctrica: (A, B) Borde, (C, D) Sur o aguas arriba, (E) Sur lejano

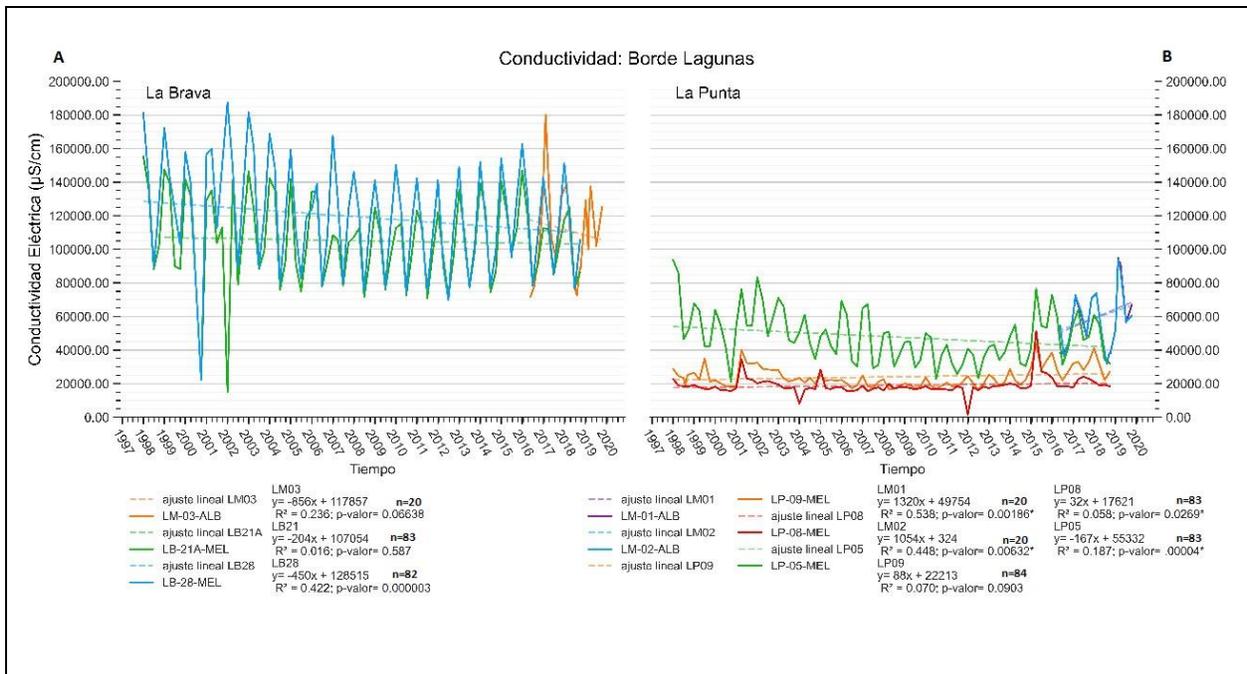
Fuente: Elaboración propia; Ejes con escala según el rango de cada serie



Figura 6-29 Conductividad eléctrica en laguna La Brava (E) Sur lejano

Fuente: Elaboración propia

Al analizar los datos, se observa que las curvas de conductividad eléctrica en Laguna La Brava presentan valores mayores que los de Laguna La Punta, durante el período histórico comprendido entre los años 1998 y 2019 (



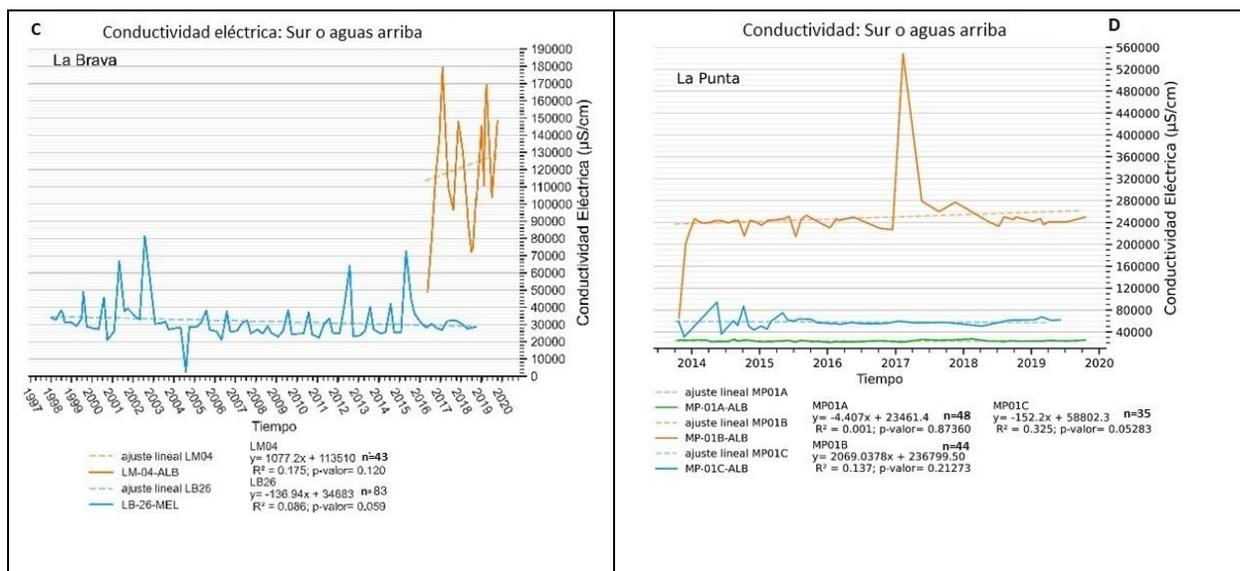


Figura 6-28 A, B y

Tabla 6-23).

Se calculó que la desviación estándar de Laguna La Brava es relativamente alta (SD promedio = 22.252  $\mu\text{S/cm}$ ) con respecto a la desviación estándar obtenido en La Punta (SD promedio = 16.664  $\mu\text{S/cm}$ ), por lo que los valores de conductividad eléctrica son dispersos. Se registran en La Brava dos valores anómalos (bajos) durante 2001 y 2002. Así también, las curvas de conductividad de La Punta en LP-08 y en LP-09 se observan estables, salvo por abruptas fluctuaciones luego de abril de 2015 (

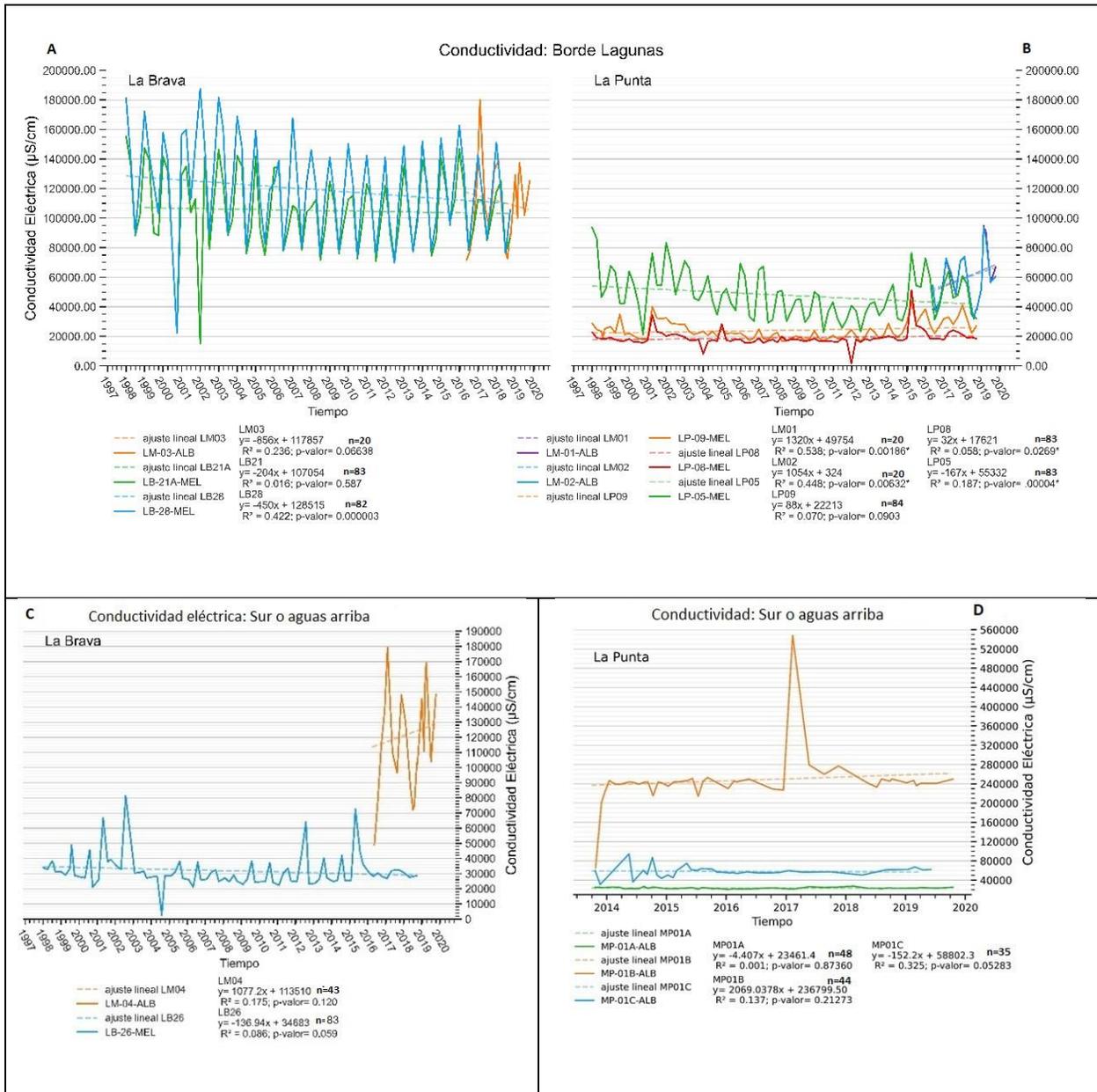


Figura 6-28 A y

Tabla 6-23). A modo general, hay un aumento de los valores en La Punta desde 2015 a 2019.

Luego, al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) sobre las curvas de tendencia de las series de conductividad medido en La Brava, se obtiene que solo la serie que corresponde a LB-28 evidencia una tendencia disminución significativa, cuya pendiente es  $-1.800 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{año}$  ( $r^2 = 0,422$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ; años 1998-2018). La serie de LB-21, que dispone de la misma extensión temporal de mediciones, presenta un coeficiente de determinación menor a 0,10, por lo que no se puede afirmar una tendencia de aumento o disminución con respaldo estadístico. En el caso de las mediciones tomas desde LM-03 (años 2016-2019) se registra un coeficiente de determinación considerable ( $r^2 = 0,236$ ), pero al aplicar el Wtest para determinar si la pendiente del ajuste lineal es significativamente distinta a cero, se obtiene un p-valor  $> 0,05$ , por lo que es estadísticamente indistinguible de cero.

Repitiendo este análisis con los registros de conductividad obtenidos desde La Punta, se obtiene que para el período de 1998 a 2018, solo la serie de LP-05 presenta un coeficiente de determinación considerable, del que se evidencia una tendencia de disminución significativa hacia el presente (pendiente =  $-668 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{año}$ ;  $r^2 = 0,187$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ). Se dispone además de dos series que provienen de mediciones de LM-01 y LM-02, cuyo registro está comprendido entre 2016 y 2019. Ambos evidencian una tendencia de aumento significativo de conductividad hacia el presente (LM-01 pendiente =  $5280 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{año}$ ;  $r^2 = 0,538$ ; Wtest p-valor  $< 0,05$ ; LM-02 pendiente =  $4216 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{año}$ ;  $r^2 = 0,448$ ; Wtest p-valor  $< 0,05$ ).

Con respecto a los valores medidos en piezómetros aguas arriba de Laguna La Punta, la curva de conductividad eléctrica en MP-01B muestra un aumento abrupto de  $65.400 \mu\text{S}/\text{cm}$  hasta  $201.500 \mu\text{S}/\text{cm}$  que se mantiene desde octubre de 2013 hacia el presente, observándose además un pulso de  $548.000 \mu\text{S}/\text{cm}$  durante febrero de 2017 que se aleja de la tendencia. Las curvas de conductividad eléctrica en MP-01-A y MP-01C, desde 2014 a 2019, son estables (; Ejes con escala según el rango de cada serie



Figura 6-29 E). Ninguna de las curvas de conductividad de este componente espacial presenta los requisitos para afirmar una tendencia de aumento o disminución a partir de un ajuste lineal. La serie medida en MP-01C presenta un coeficiente de determinación considerable ( $r^2 = 0,325$ ), pero con un p-valor ( $W\text{test}$ )  $>0,05$  pero que se encuentra en el margen de lo que se puede considerar significativo. De este modo, se puede sugerir, pero no afirmar, que a partir de su ajuste lineal una tendencia de disminución de  $-608 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{año}$

Con respecto a aguas arriba de La Brava, para el período reciente 2016 a 2019, se observa una dispersión alta de datos en LM-04 ( $SD = 34883 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) y en LB-26 se observa una curva de conductividad eléctrica estable durante los años 2005 a 2012, observándose ascensos y descensos durante el período previo desde 1998 a 2011 y desde 2013 a 2019. Estas dos series tampoco cumplen los requisitos para afirmar una tenencia de aumento o descenso a partir de un ajuste lineal.

Para aguas arriba o sur lejano de La Brava, se observa que la curva de conductividad eléctrica en MP-03-A es constante desde 2013 a 2019 (; Ejes con escala según el rango de cada serie

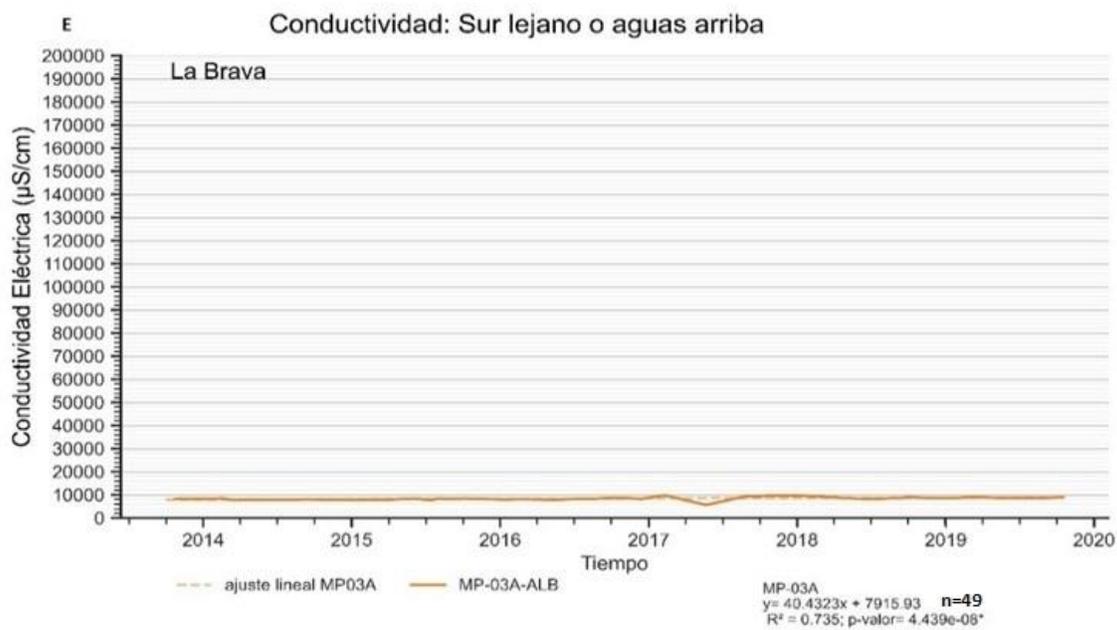


Figura 6-29 E). Para MP-03A no se presentan datos, dado que este piezómetro está ranurado a mayor profundidad que el resto.

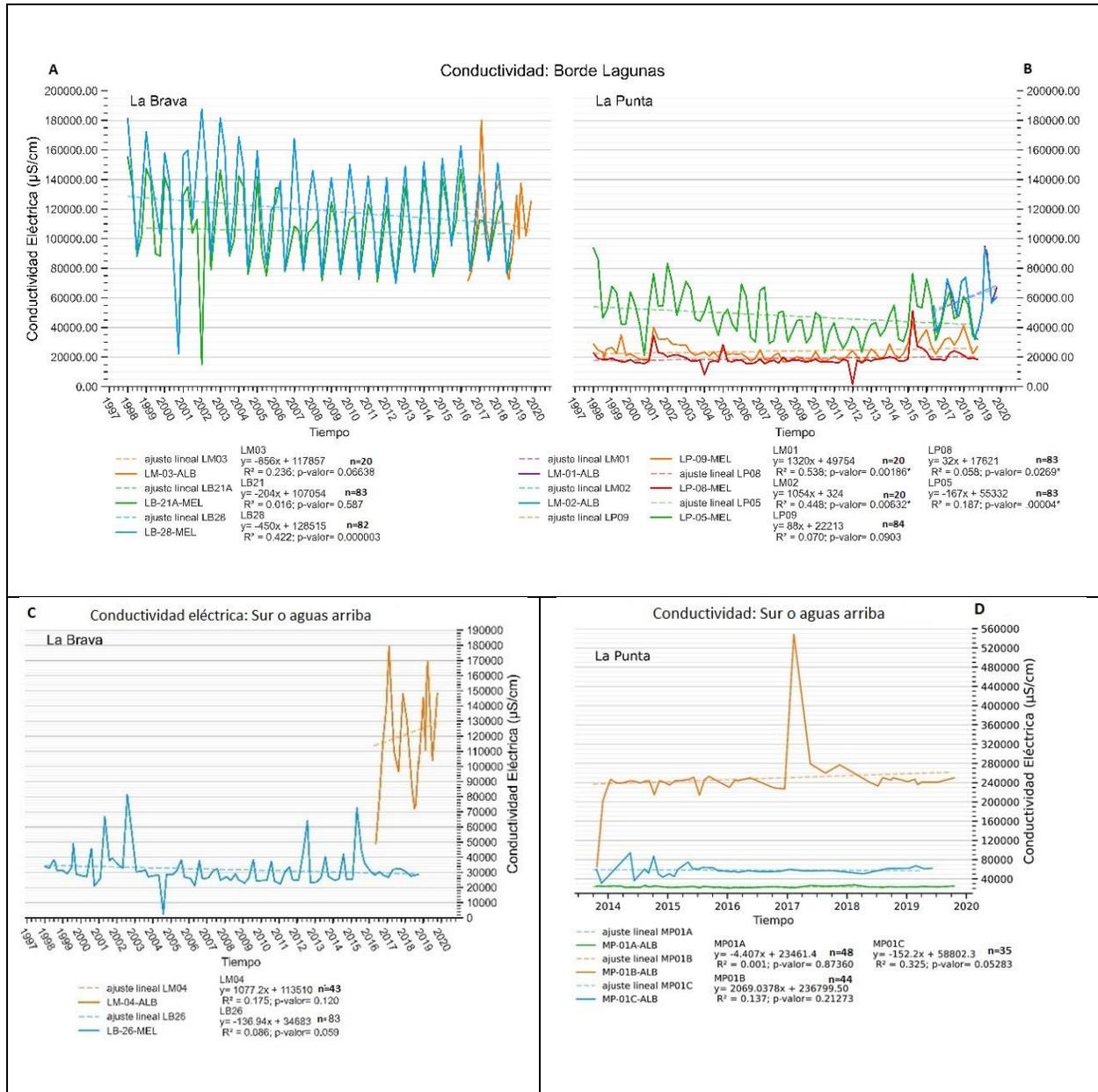


Figura 6-28 Conductividad eléctrica: (A, B) Borde, (C, D) Sur o aguas arriba, (E) Sur lejano

Al comparar los cambios relativos de los conjuntos de datos durante el período histórico 1998-2018, se observa una variación negativa en La Brava en LB-28 (-18.928  $\mu\text{S/cm}$ ) y también en La Punta en LP-05 (-12.345  $\mu\text{S/cm}$ ),

registrándose como mayor descenso el evidenciado para La Brava. Durante el período de 2016 a 2019, se evidencian variaciones positivas en LM-01 (+19813  $\mu\text{S/cm}$ ) y en LM-02 (+15818  $\mu\text{S/cm}$ ;

Tabla 6-24).

Al comparar los conjuntos de conductividades eléctricas de ambas lagunas considerando el período de 1998 a 2019, se observa que los valores son mayores en Laguna La Brava que en La Punta (MWtest p-valor < 0,001)

### 6.2.1.8. Parámetros in situ de lagunas superficiales

Los resultados para estos parámetros son obtenidos a través de la data generada por Minera Escondida a partir del año 1996 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones del año y por Albemarle desde el año 2013 hasta 2019, con muestreos semestrales en invierno y verano, y Minera Zaldívar, con muestreos en 2016 y 2017. Cabe destacar que en estos últimos no hay continuidad respecto a los años.

Considerando la totalidad de los datos disponibles para parámetros *in situ* de lagunas superficiales, sin diferenciar origen de los datos, se obtienen los estadígrafos de la Tabla 6-24. Es posible observar una gran amplitud de la distribución de los datos al no discriminar entre empresa, puntos de muestreo, lagunas ni estación del año.

Tabla 6-25 Estadígrafos parámetros *in situ*

	N observaciones	Promedio	SD	Mínima	Máxima	Moda	Mediana
Temp (°C)	592	18,36	5,92	2,60	33,53	20,60	18,40
pH	592	8,15	0,37	4,20	9,00	8,20	8,18
OD (mg/L)	592	7,31	2,39	0,70	34,00	6,50	7,53
CE (mS/cm)	585	60,16	42,89	15,38	187,60	23,70	42,40
Sal (NaCl g/L)	243	31,70	24,93	0,00	87,20	0,00	23,70

Fuente: Elaboración propia. Temp: temperatura del agua; OD: oxígeno disuelto; CE: conductividad eléctrica; Sal: Salinidad

Al agrupar los datos espacialmente por laguna (Tabla 6-25), se observa que Laguna La Punta registra el mínimo de temperatura (2,6 °C), el mínimo valor de pH (4,2), la mínima concentración de oxígeno disuelto (0,7 mg/L) y también la mínima conductividad eléctrica (15,38 mS/cm). En tanto, los valores máximos de temperatura (33,53 °C), OD (34 mg/L) y CE (187,6 mS/cm) se registran en Laguna La Brava y los máximos de pH (9,0) y Salinidad (87,20 NaCl g/L) se registran en Laguna La Punta.

Los promedios por laguna para cada parámetro fueron sometidos a los test estadísticos correspondientes, obteniéndose finalmente que existen diferencias significativas entre las lagunas La Punta y La Brava para los parámetros de temperatura (LB > LP), pH (LP > LB), conductividad (LB >> LP) y salinidad (LB > LP). En tanto las concentraciones de oxígeno disuelto no presentan diferencia significativa entre ambas lagunas. A continuación,

se analizan estas variables detalladamente. Para cada variable se muestran las series de tiempo agrupadas por laguna, y luego el detalle de la serie de tiempo de cada punto de muestreo, de modo que es posible observar desviaciones temporales y espaciales según fueron medidas.

Tabla 6-26 Estadígrafos por laguna de parámetros *in situ*

Parámetro	Temp		pH		OD (mg/L)		CE (mS/cm)		Sal (NaCl g/L)	
	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP
N observaciones	311	281	311	281	311	281	307	278	138	105
Promedio	19,66	16,93	8,05	8,26	7,21	7,41	83,51	34,37	39,07	22,03
SD	6,09	5,37	0,26	0,45	2,76	1,88	43,49	22,72	26,35	19,11
Mínima	3,10	2,60	6,00	4,20	1,10	0,70	21,00	15,38	0,00	0,00
Máxima	33,53	31,30	8,80	9,00	34,00	11,38	187,60	165,10	70,00	87,20
MWtest (p-valor)	0,001221342		1,56E-13		0,24751207		1,72E-27		5,96E-06	
Dif.sig.	sí		sí		no		sí		sí	

Fuente: Elaboración propia. Dif.sig: diferencia significativa; Temp: temperatura del agua; OD: oxígeno disuelto; CE: conductividad eléctrica; Sal: Salinidad; LB: La Brava; LP: La Punta

- **Temperatura del agua (°C)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-30), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1$  unidad de desviación estándar =  $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó un aumento progresivo de primavera a verano y una disminución de otoño a invierno. Esta tendencia es marcada a través de los años, lo que se refleja en la fuerte oscilación estacional de ambas curvas.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que Laguna La Punta muestra una tendencia a la disminución de la temperatura hacia el presente (pendiente =  $-0,087$  °C/año), sin embargo, la curva de tendencia obtenida no presenta una correspondencia considerable a un modelo lineal ya que el  $r^2$  del ajuste es inferior a 0,10 ( $r^2 = 0,07919$ ), lo que invalida el p-valor ( $p\text{-valor} < 0,05$ ) obtenido mediante Wtest para la pendiente. Laguna La Brava no presenta correspondencia a un modelo lineal y su pendiente no resulta significativamente distinto a cero ( $r^2 = 0,018019$ ;  $p\text{-valor} > 0,05$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-33), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo. Este análisis se realizó con los puntos de muestreo LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26, ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones ( $n=76$ ). El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un  $p\text{-valor} < 0,001$ , utilizando las observaciones del

período 1996-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren significativamente entre sí, entregando como resultado los pares indicados en la Tabla 6-26.

Tabla 6-27 Diferencias en puntos de muestreo de temperatura

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	0,00168
LBLB03	LBLB26	0,001576
LBLB21	LBLP02	0,002037
LBLB21	LBLP03	3,94E-05
LBLB26	LBLP02	0,001947
LBLB26	LBLP03	3,55E-05

Fuente: Elaboración propia.

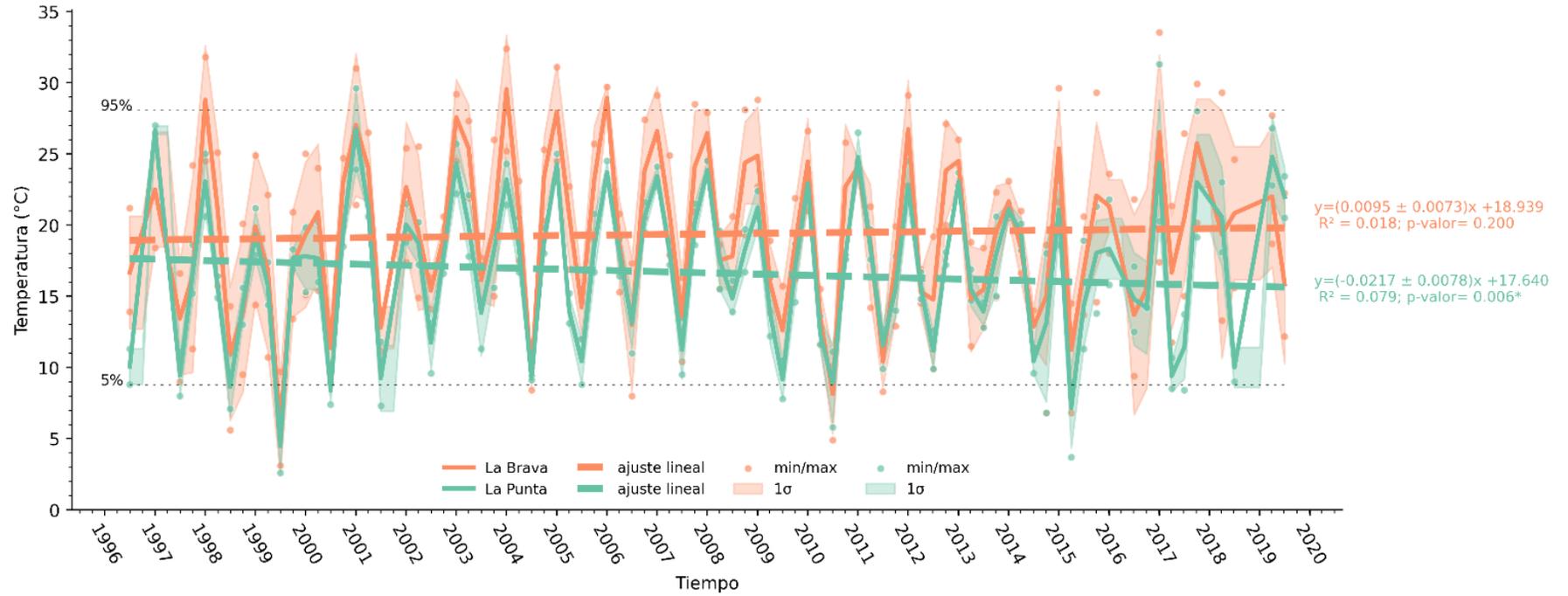


Figura 6-30 Análisis temporal y espacial de temperatura del agua de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1\sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

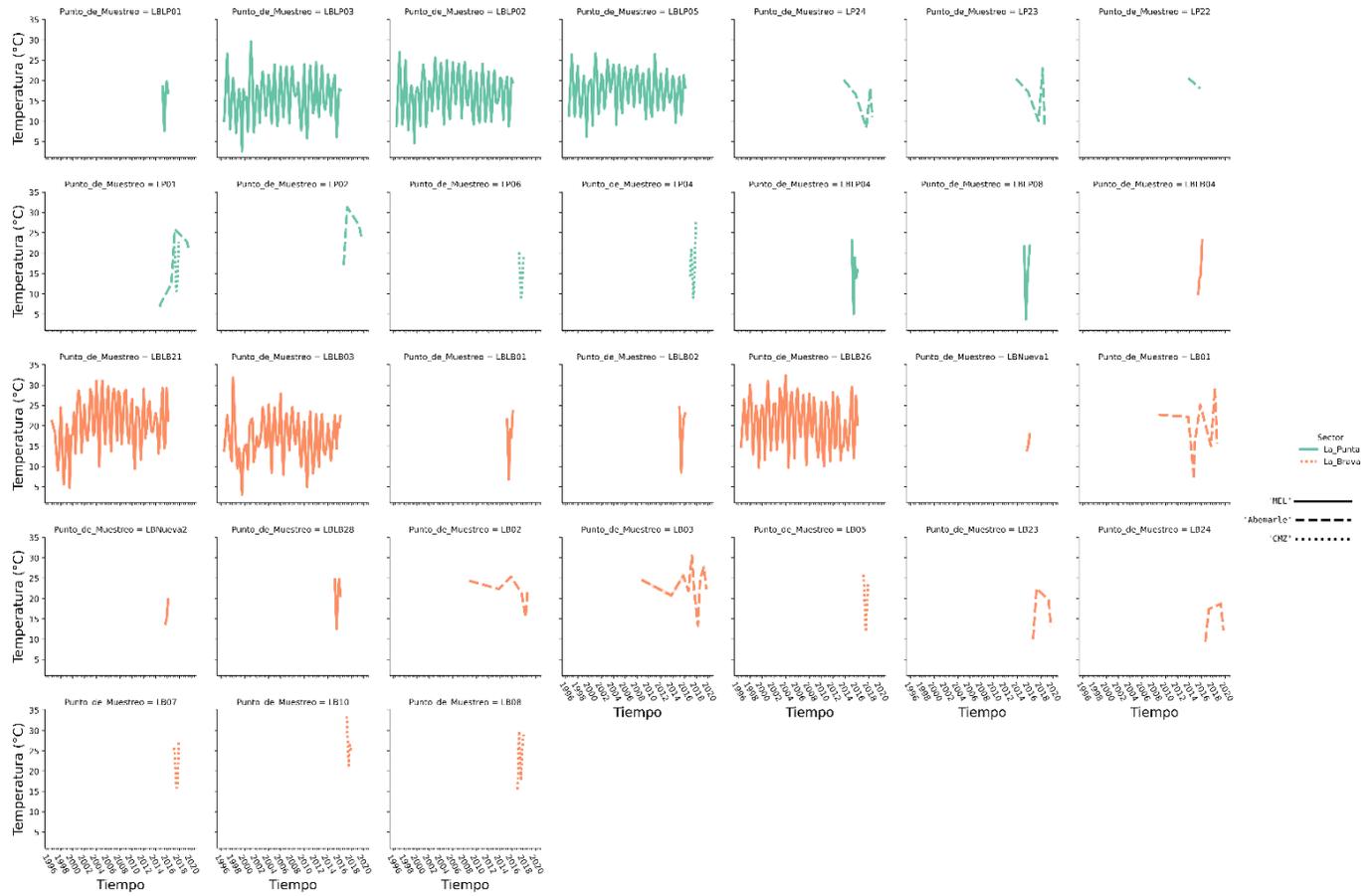


Figura 6-31 Análisis temporal de temperatura del agua por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia

- pH

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-32), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó la curva de La Punta con valores significativamente mayores (más alcalina) a los de La Brava en la mayoría de los períodos evaluados. La diferencia de medianas entre lagunas para el pH resulta significativa con un p-valor  $< 0,001$  según MWtest.

Respecto de los valores extremos, cabe destacar que el mínimo reportado (4,2) se registra en verano 1999 y el máximo (9,0) en verano 2016, ambos valores reportados en La Punta.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que Laguna La Punta muestra una tendencia al aumento significativo del pH hacia el presente (pendiente = +0,01636 por año), la que resulta linealmente determinada y significativa con un  $r^2 = 0,37848$  y un p-valor  $< 0,001$  (Wtest). La Brava no resulta significativa.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-35), se realizó el análisis con los puntos de muestreo LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03, LBLB26 ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones (n=76). El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando las observaciones del período 1996-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren significativamente entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-29.

Tabla 6-28 Diferencias en puntos de muestreo de pH

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	0,034187
LBLB03	LBLP02	1,45E-13
LBLB03	LBLP03	6,27E-19
LBLB03	LBLP05	8,75E-10
LBLB21	LBLB26	0,003005
LBLB21	LBLP02	3,64E-06
LBLB21	LBLP03	7,76E-10
LBLB21	LBLP05	0,001011
LBLB26	LBLP02	1,99E-16
LBLB26	LBLP03	2,65E-22
LBLB26	LBLP05	3,65E-12

Fuente: Elaboración propia.

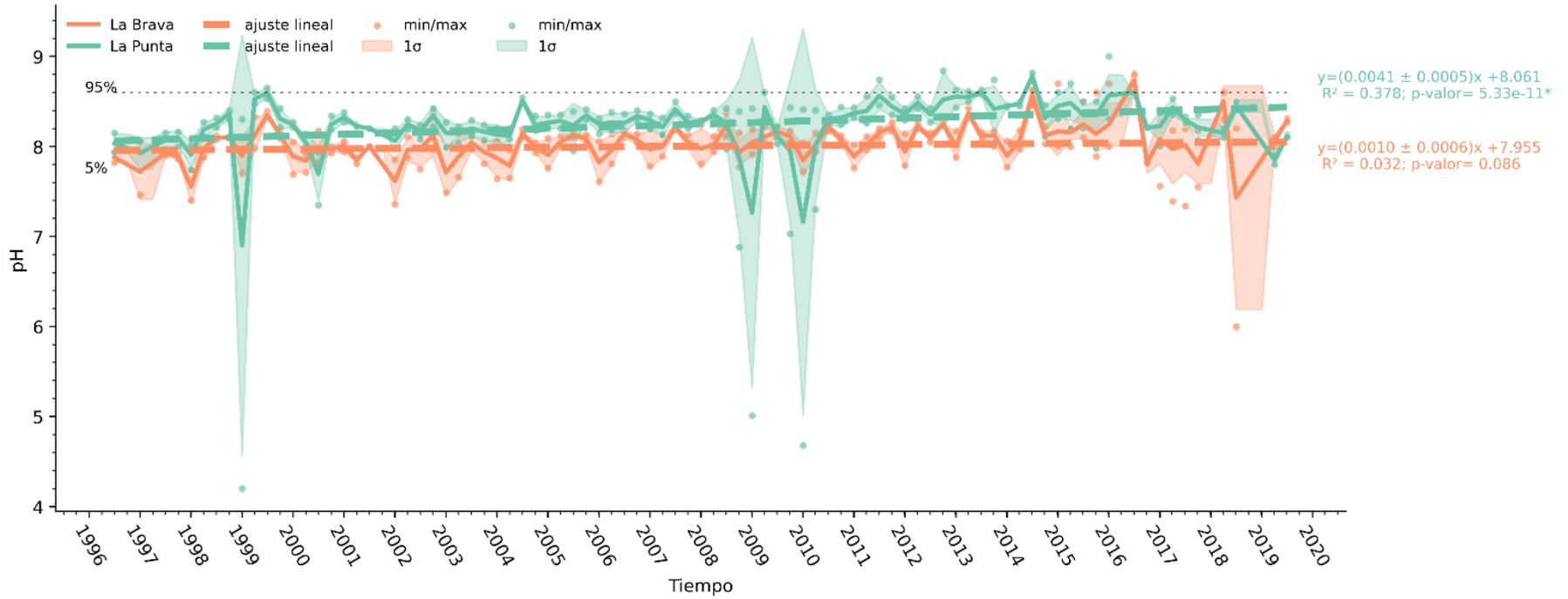


Figura 6-32 Análisis temporal y espacial de pH de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

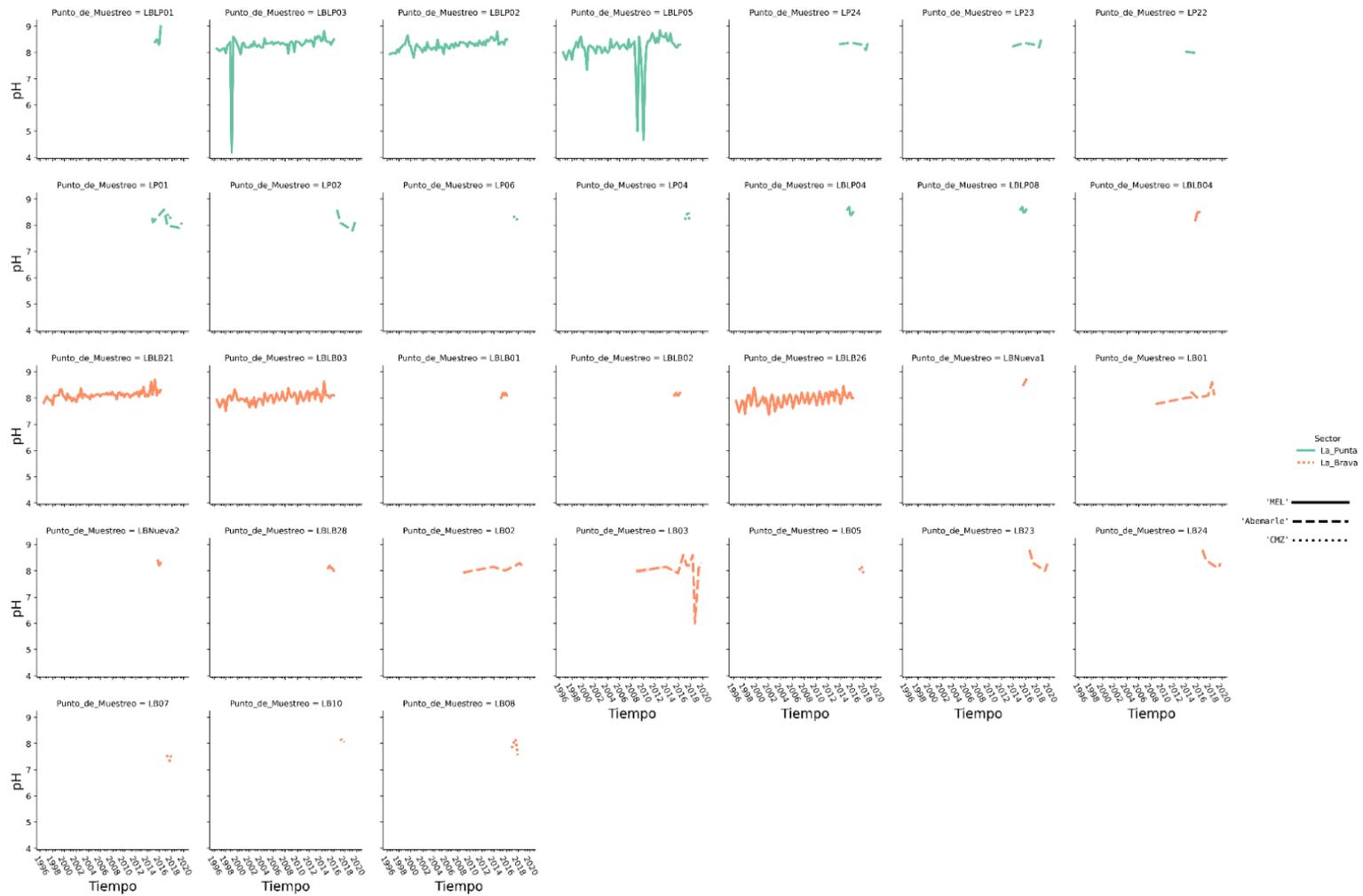


Figura 6-33 Análisis temporal de pH por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Oxígeno Disuelto (mg/L)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-34), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una tendencia a la disminución de las concentraciones de oxígeno hacia el presente, tanto en La Punta como en La Brava. El mínimo reportado (0,70 mg/L) en verano 2017 en La Punta y el máximo (14,39 mg/L) en otoño 2001 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se obtiene que la disminución observada tiene una pendiente en La Punta de -0,161 mg/L/año y en La Brava una pendiente de -0,105 mg/L/año, ambas con correspondencia a un modelo lineal y de pendiente significativamente distinto a cero, dado el  $r^2$  de 0,54402 y 0,359701, respectivamente, y ambos p-valor  $< 0,05$ .

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-37), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo. Este análisis se realizó con los puntos de muestreo LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26, ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones ( $n=76$ ). El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando los datos del período 1996-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares indicados en la Tabla 6-30.

Tabla 6-29 Diferencias en puntos de muestreo de Oxígeno Disuelto

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	3,69E-11
LBLB03	LBLP02	0,001753
LBLB03	LBLP03	0,003521
LBLB21	LBLB26	4,16E-11
LBLB21	LBLP02	0,009356
LBLB21	LBLP03	0,004792
LBLB21	LBLP05	2,6E-07
LBLB26	LBLP02	0,001787

Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que el oxígeno disuelto es uno de los indicadores más importantes de la calidad del agua. Los valores normales varían entre 7.0 y 8.0 mg/L, donde la fuente principal del oxígeno es el aire, el cual difunde rápidamente en el agua y las concentraciones se ven afectadas por la temperatura (Roldán, 2003).

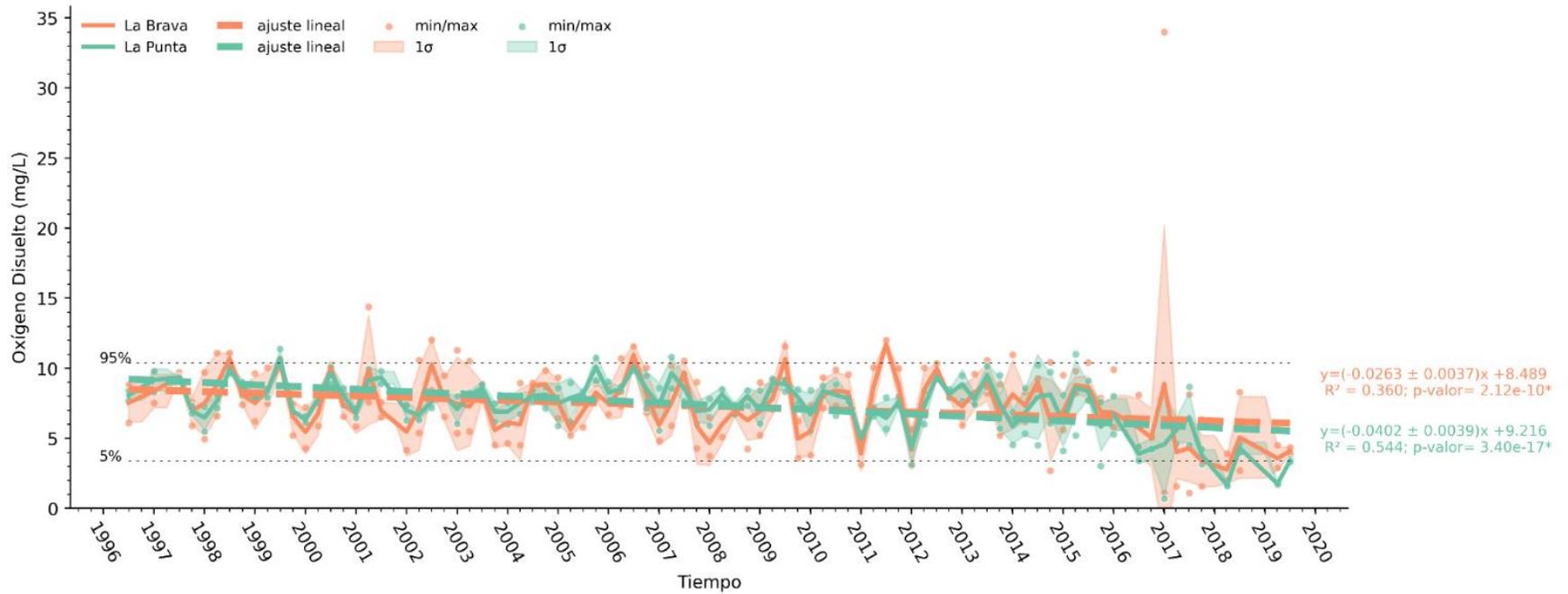


Figura 6-34 Análisis temporal y espacial de oxígeno disuelto de las Laguna La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

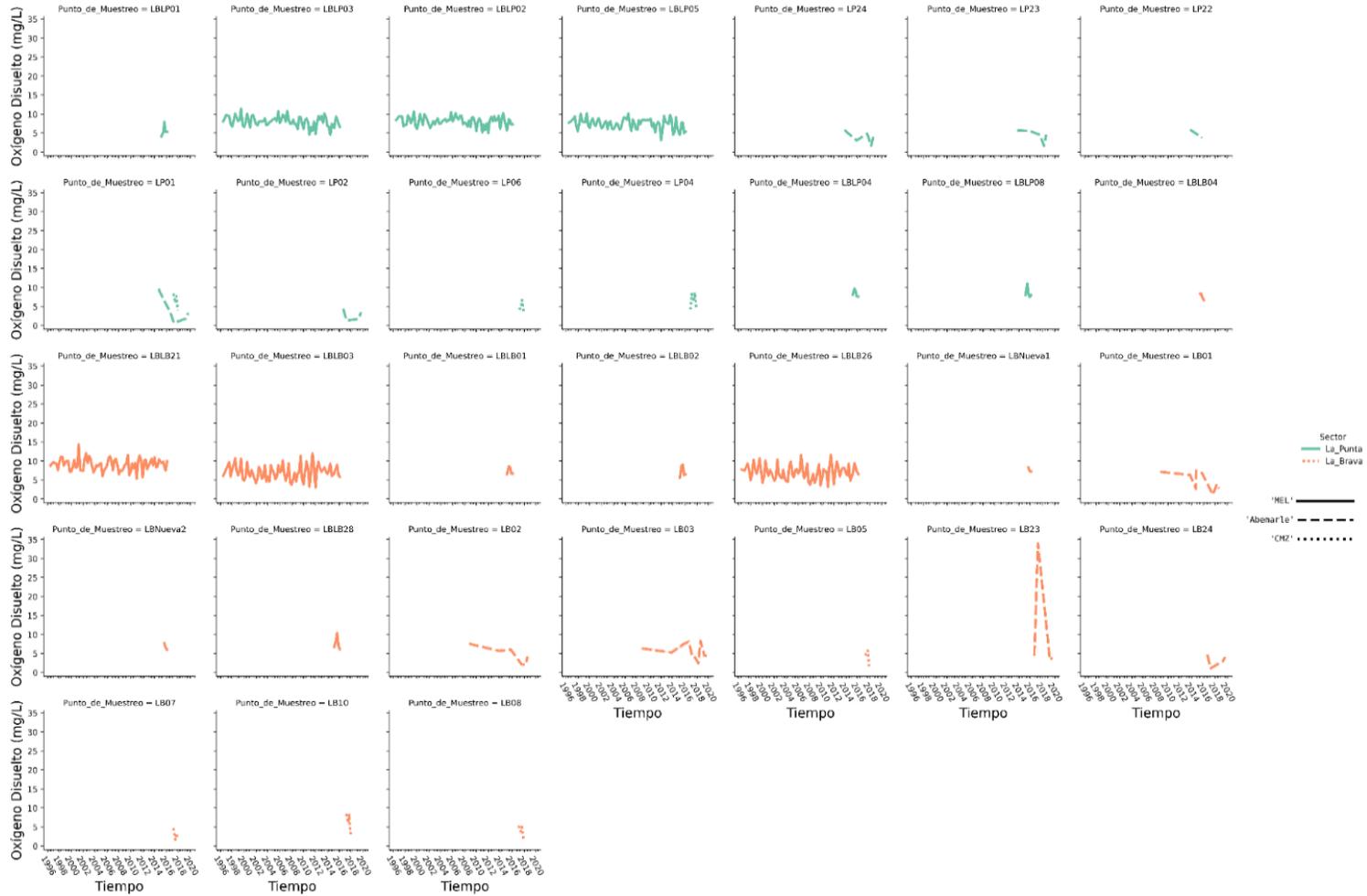


Figura 6-35 Análisis temporal de oxígeno disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Conductividad Eléctrica (mS/cm)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-36), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de conductividad de La Brava presenta promedios mayores que los de La Punta en el período de 1996 a 2016 de manera continua. Además, La Brava muestra una tendencia a la disminución de las conductividades hacia el presente, en tanto La Punta muestra la tendencia inversa, pero menos pronunciada. Ambos conjuntos difieren estadísticamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest; 1996-2016).

Por otra parte, ambas series de tiempo muestran variabilidad estacional, con mayores conductividades en verano y menores en invierno, comportamiento coincidente con la variabilidad de las curvas de temperatura.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la Laguna La Brava muestra correspondencia lineal y una pendiente significativamente negativa para las series de conductividad hacia el presente (pendiente =  $-0,982$  mS/cm/año;  $r^2 = 0,4391$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-39), se realizó el análisis con los puntos de muestreo LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26, ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones ( $n=76$ ). El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ . Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-29.

Cabe destacar que la conductividad depende de la presencia de iones, su concentración, y la temperatura de medición y la variación de la conductividad estaría directamente relacionada con el aumento de la temperatura del agua (Ramírez y Viña 1998), la cual disminuiría el volumen del agua, concentrando principalmente iones (sólidos disueltos).

Tabla 6-30 Diferencias en puntos de muestreo de Conductividad Eléctrica

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	2,27E-16
LBLB03	LBLP02	1,61E-47
LBLB03	LBLP03	4,88E-32
LBLB03	LBLP05	2,4E-07
LBLB21	LBLB26	5,53E-19
LBLB21	LBLP02	4,11E-09
LBLB21	LBLP03	0,001714
LBLB21	LBLP05	0,007874
LBLB26	LBLP02	5,57E-52
LBLB26	LBLP03	1,06E-35
LBLB26	LBLP05	4,81E-09

Punto A	Punto B	p-valor
LBLP02	LBLP03	0,015085
LBLP02	LBLP05	3,85E-19
LBLP03	LBLP05	5,24E-10

Fuente: Elaboración propia.

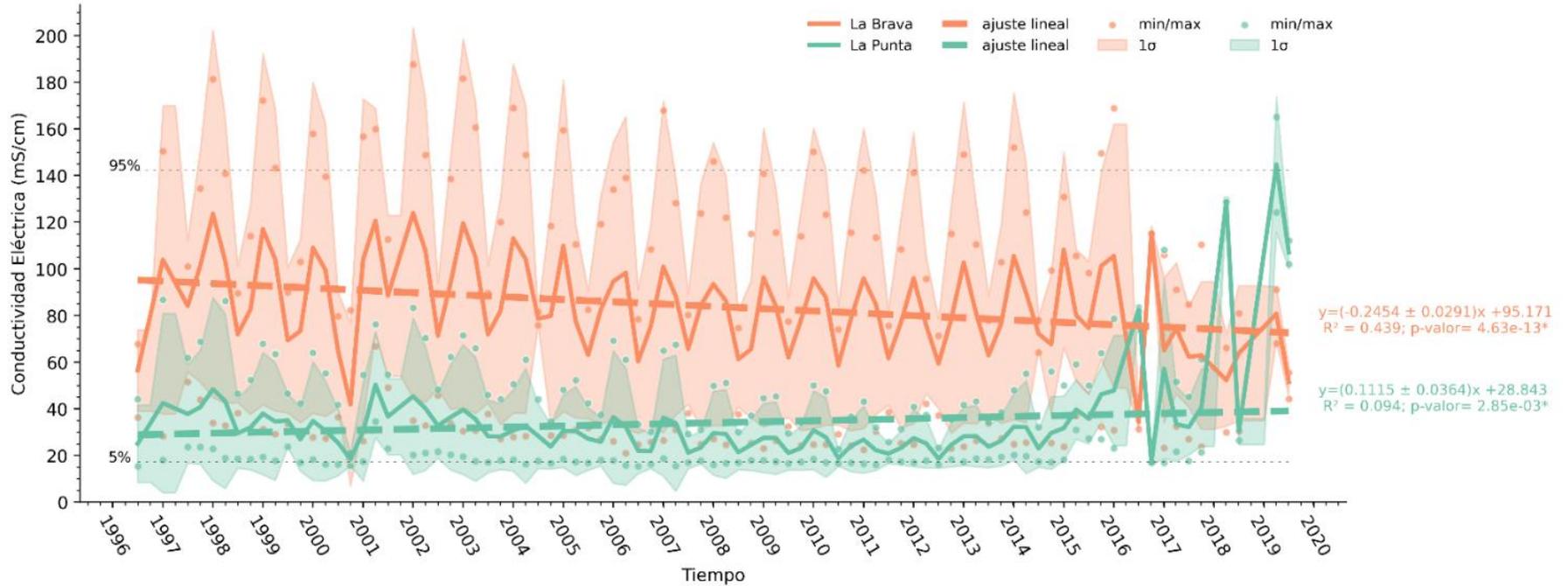


Figura 6-36 Análisis temporal y espacial de conductividad de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

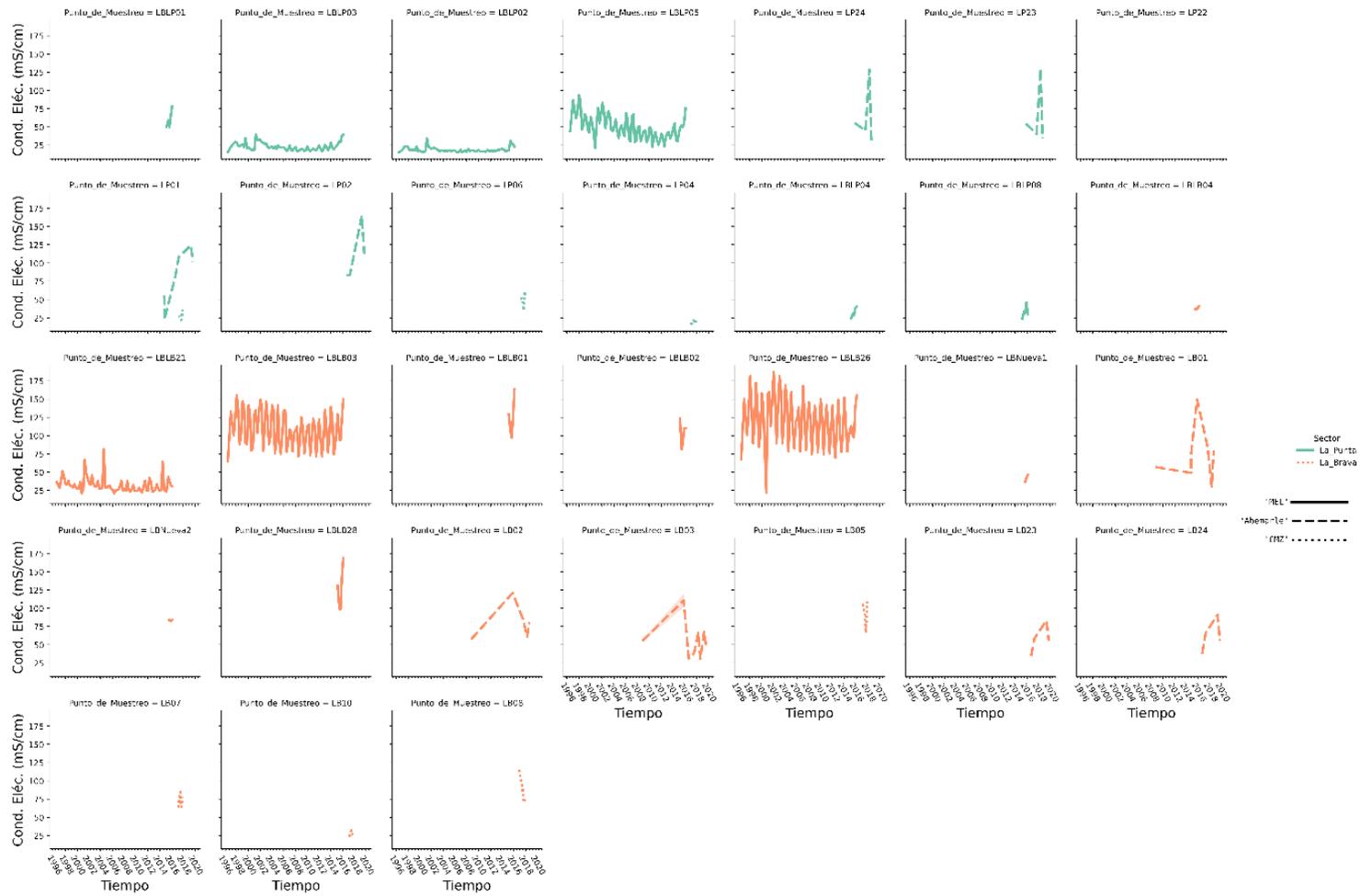


Figura 6-37 Análisis temporal de conductividad eléctrica por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Salinidad (NaCl g/L)**

Los valores de salinidad reportados por Minera Escondida son a partir de 2010 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones de cada año y por Albemarle desde el 2015 hasta 2019, con muestreos semestrales en invierno y verano. Este rango de la serie de tiempo difiere del utilizado para los otros parámetros *in situ*.

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-38), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de salinidad de La Brava presenta el mismo patrón de variación hasta el año 2016, con medianas mayores que los de La Punta de manera continua, difiriendo ambos conjuntos de manera significativa con p-valor  $< 0,001$  (MWtest).

Al igual que la conductividad, la salinidad muestra tendencia a la disminución en La Brava y a un ligero aumento en La Punta hacia el presente, además de mostrar también la variabilidad estacional ya registrada en temperatura y conductividad. El mínimo reportado (9,3 NaCl g/L) en invierno 2012 y el anómalo máximo (87,2 NaCl g/L) en invierno 2019 en La Punta, considerando que hasta el año 2016 La Punta siempre registró salinidades inferiores a La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que la serie de La Punta presenta una tendencia de aumento significativo, con una pendiente de 1.053 NaCl g/L/año hacia el presente, mientras que la serie de La Brava con una pendiente negativa de -2.0654 NaCl g/L/año. La regresión lineal en la serie de la Punta da un  $r^2 = 0,142651$  y el Wtest un p-valor  $< 0,05$ , en tanto en la serie de La Brava resultó con  $r^2 = 0,21579$  y un p-valor  $< 0,05$ .

Aumentando la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, todas las variables *in situ* presentaron un p-valor  $< 0.05$  en el KWtest, excepto salinidad que no se presenta suficiente continuidad de la serie temporal, por lo que no se puede determinar correctamente con los datos existentes si puntos de muestreo difieren significativamente entre sí.

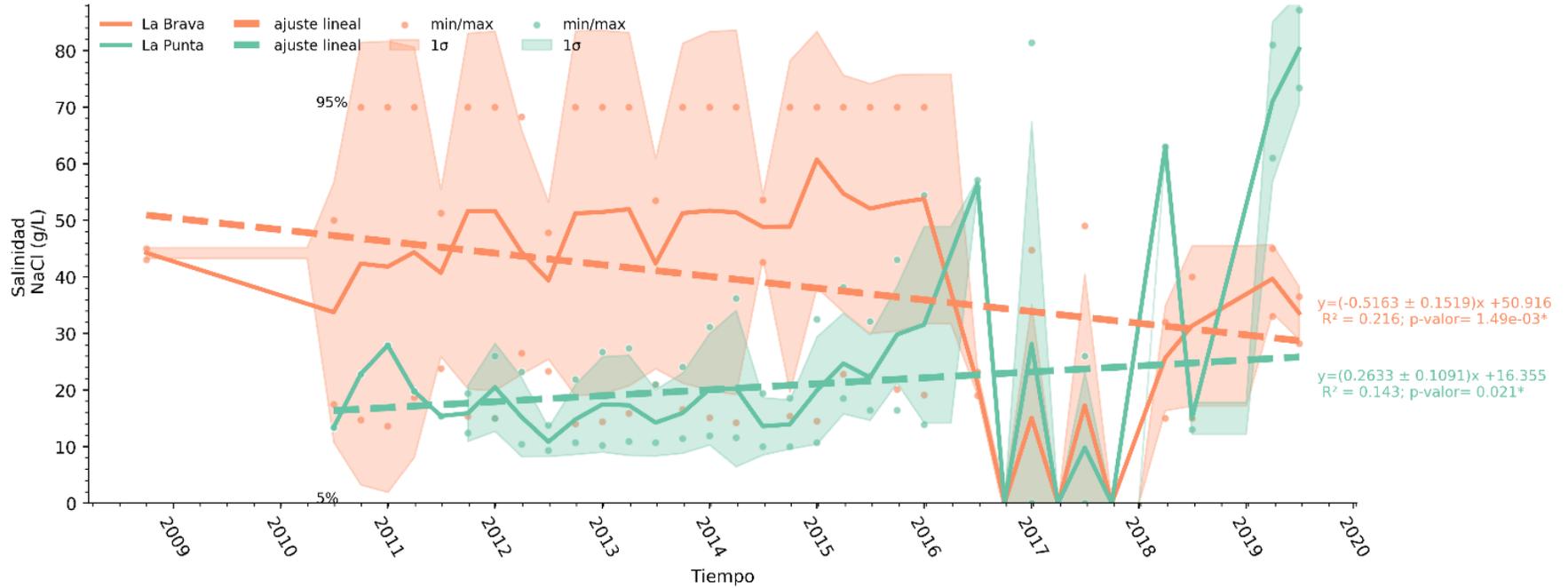


Figura 6-38 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

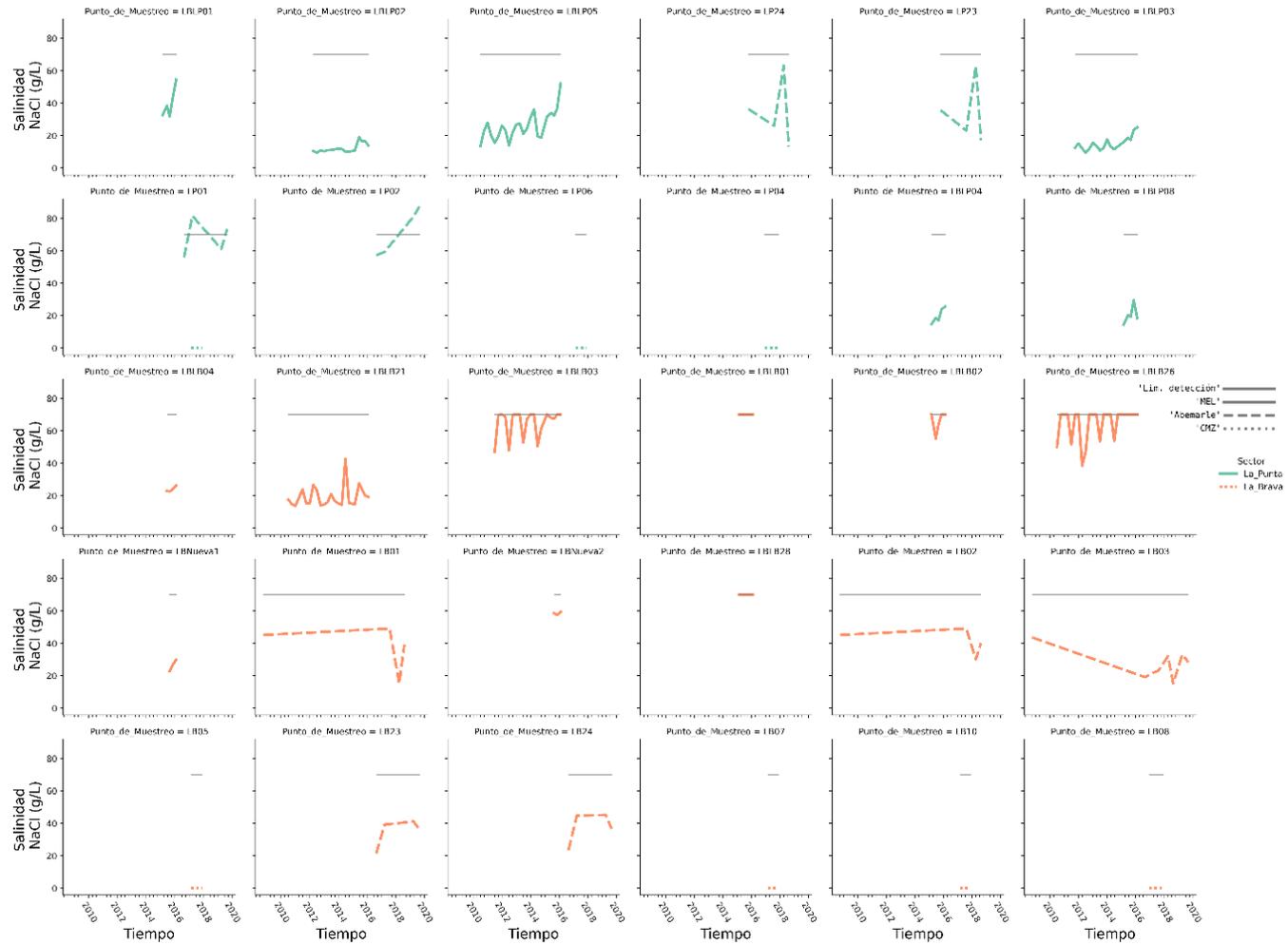


Figura 6-39 Análisis temporal de salinidad por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.1.9. Macroelementos de lagunas superficiales

La determinación química de los macroelementos fue obtenido a través de la data generada por Minera Escondida a partir del año 1996 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones del año, Albemarle desde el año 2013 hasta 2019, con muestreos semestrales en invierno y verano, y Minera Zaldívar, con muestreos en 2016 y 2017. Cabe destacar que en estos últimos no hay continuidad respecto a los años.

Teniendo en cuenta la totalidad de los datos disponibles para los macroelementos de lagunas superficiales, sin diferenciar origen de los datos, se obtienen los estadígrafos de la Tabla 6-30. Se observa una gran amplitud de la distribución de los datos al no discriminar entre empresa, puntos de muestreo, lagunas ni estación del año.

Tabla 6-31 Estadígrafos macroelementos de lagunas superficiales

Parámetro	N observaciones	Promedio	SD	Mínima	Máxima	Moda	Mediana
Bicarbonato (NaHCO <sub>3</sub> mg/L)	538	375,89	209,09	0	1516	280	322,00
Calcio Disuelto (Ca mg/L)	496	457,54	413,24	12	5700	173	319,50
Carbonato (CO <sub>3</sub> mg/L)	534	145,40	142,62	0	821	5	93,65
Cloruro (Cl mg/L)	542	24637,35	22762,30	5	150259	7743	14214,50
Fluoruro (F mg/L)	263	0,44	0,22	0	1,6	0,5	0,50
Magnesio Disuelto (Mg mg/L)	495	1192,40	1038,28	1	4613	2889	721,96
Potasio (K mg/L)	77	2497,37	1912,24	0,35	7256	1841	1680,79
Sodio Disuelto (Na mg/L)	496	13306,45	14635,99	1620	149400	28330	6481,50
Sulfato (SO <sub>4</sub> mg/L)	542	3117,65	2625,83	157	15328	3300	2246,40

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se presentan los datos de manera espacial, por laguna (Tabla 6-31). Se observa que la Laguna La Punta registra el máximo de bicarbonato (1516 mg/L), el mayor valor de calcio disuelto (5700 mg/L), valores máximos de cloro (150259 mg/L), registros máximos de fluoruro (1,60 mg/L). En tanto, los valores mínimos de calcio disuelto (803 mg/L), carbonato (430 mg/L), cloro (135029 mg/L) y fluoruro (1,10 mg/L) se registran en la Laguna La Brava. Por su parte, los máximos de magnesio disuelto (4613 mg/L), potasio (7256 mg/L), sodio disuelto (149400 mg/L) y sulfato (15328 mg/L) se registran en Laguna La Punta.

Los promedios por laguna para cada parámetro fueron sometidos a los test estadísticos correspondientes, obteniéndose finalmente que existen diferencias significativas entre las lagunas La Punta y La Brava para los parámetros de calcio disuelto (LB>LP), carbonato (LB>LP), cloro (LB>LP), fluoruro (LB>LP), magnesio disuelto (LB>LP), potasio (LB>LP), sodio disuelto (LB>LP) y sulfato (LB>LP). En tanto las concentraciones de bicarbonato no presentan diferencia significativa entre ambas lagunas.

Tabla 6-32 Estadígrafos por laguna de macroelementos

Parámetro	Bicarbonato (mg/L)		Calcio Disuelto (mg/L)		Carbonato (mg/L)		Cloro (mg/L)		Fluoruro (mg/L)		Magnesio Disuelto (mg/L)		Potasio (mg/L)		Sodio Disuelto (mg/L)		Sulfato (mg/L)	
	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP
N observaciones	278,00	260,00	253,00	243,00	277,00	257,00	282,00	260,00	113,00	150,00	253,00	242,00	44,00	33,00	253,00	243,00	282,00	260,00
Promedio	393,03	357,57	639,32	268,27	202,89	83,44	36250,81	12041,21	0,34	0,51	1825,44	530,59	3355,71	1352,91	20826,43	5477,00	4465,60	1655,64
SD	255,57	141,90	497,71	144,36	168,73	65,00	23935,04	12433,11	0,21	0,19	1094,35	311,40	2104,34	608,60	17092,31	3642,50	2781,50	1372,71
Mínima	0,00	0,00	81,00	12,00	1,00	0,00	6397,00	5,00	0,00	0,00	1,00	106,10	0,35	536,00	2093,00	1620,00	188,00	157,00
Máxima	1516,00	965,80	5700,00	803,00	821,00	430,00	150259,00	135029,00	1,60	1,10	4613,00	2080,00	7256,00	2999,00	149400,00	24320,00	15328,00	9755,50
MWtest (p-valor)	0,404751666		6,30587E-24		8,78452E-15		1,55974E-25		8,79875E-11		1,83332E-34		1,87323E-26		3,03132E-26		8,23488E-19	
Dif.sig.	No		sí		sí		sí		sí		sí		sí		sí		sí	

Fuente: Elaboración propia. Dif.sig: diferencia significativa; LB: La Brava; LP: La Punta

- **Carbonato (mg/L)**

Se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-40), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una tendencia a la disminución de las concentraciones de carbonato hacia el presente tanto en La Punta como en el sistema lagunar La Brava. El mínimo reportado (1,12 mg/L) en otoño 2009 en La Punta y el máximo (1516 mg/L) en verano 1998 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo Laguna La Brava muestra una correspondencia lineal y una pendiente significativamente negativa para la serie de concentración de carbonato hacia el presente (pendiente = -20,301 mg/L/año;  $r^2 = 0,4179$ ; Wtest p-valor < 0,001).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-41), se realizó el análisis con los puntos de muestreo LBLP03 (n=75), LBLP02 (n=75), LBLP05 (n=75), LBLB21 (n=76), LBLB03 (n=76) y LBLB26 (n=75), ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones. El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor < 0,001, utilizando los datos del período 1996-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-33.

Tabla 6-33 Diferencias en puntos de muestreo de Carbonato

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	0,034187
LBLB03	LBLP02	1,45E-13
LBLB03	LBLP03	6,27E-19
LBLB03	LBLP05	8,75E-10
LBLB21	LBLB26	0,003005
LBLB21	LBLP02	3,64E-06
LBLB21	LBLP03	7,76E-10
LBLB21	LBLP05	0,001011
LBLB26	LBLP02	1,99E-16
LBLB26	LBLP03	2,65E-22
LBLB26	LBLP05	3,65E-12

Fuente: Elaboración propia.

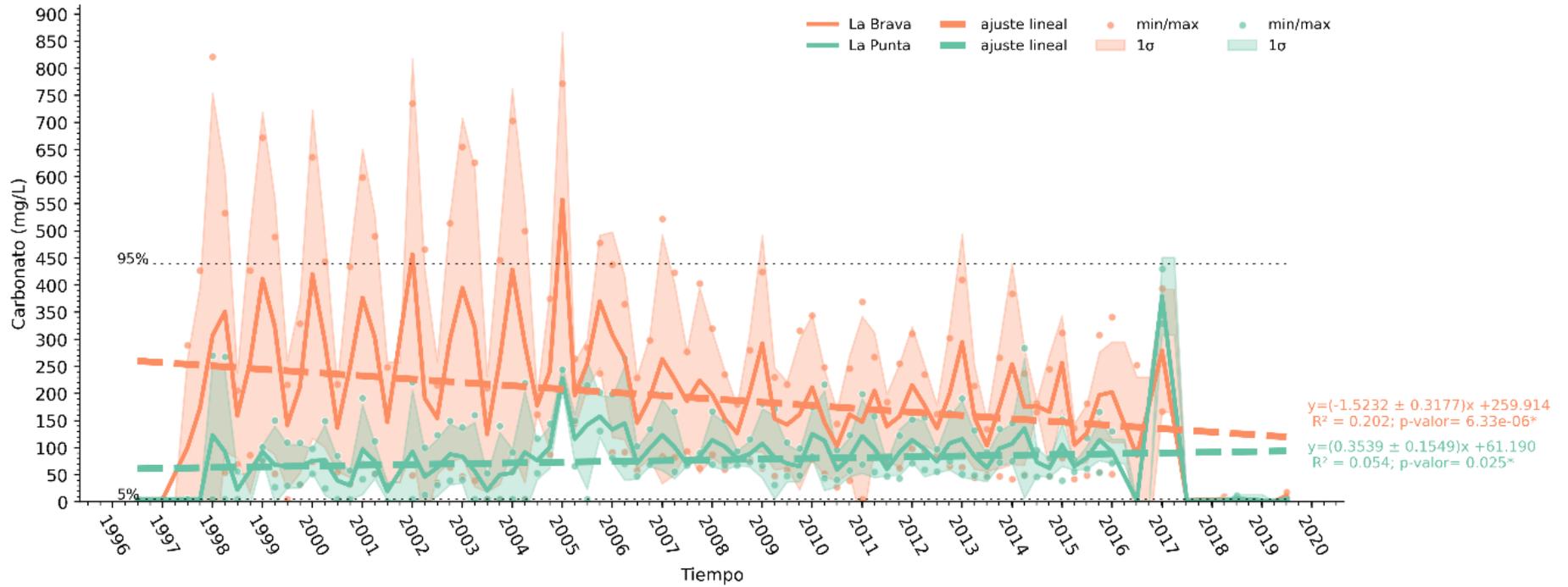


Figura 6-40 Análisis temporal y espacial de carbonato de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

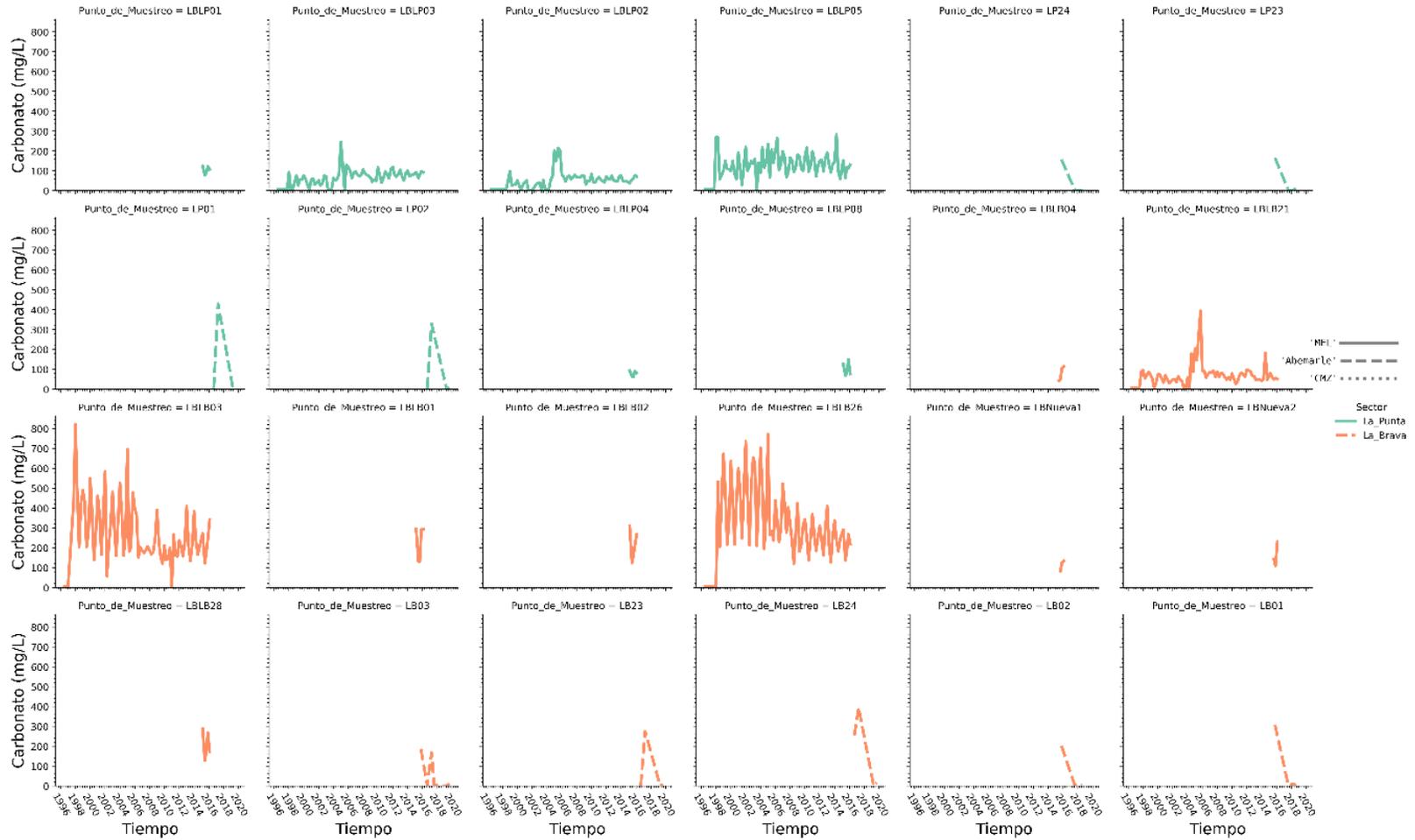


Figura 6-41 Análisis temporal de carbonato por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Bicarbonato (mg/L)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-42), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de bicarbonato presenta tendencia a la baja a partir del año 2004 para ambas lagunas. Además, La Punta muestra una tendencia al aumento de las concentraciones de bicarbonato hacia el presente, en tanto La Brava muestra la tendencia inversa, pero menos pronunciada. Ambos conjuntos difieren estadísticamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest; 1996-2019). Por otra parte, ambas series de tiempo muestran variabilidad estacional, con mayores registros de concentraciones en invierno y menores en verano.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa tendencias de disminución de concentraciones de bicarbonato. Se obtiene una pendiente en la serie de La Punta de  $-10.532$  mg/L/año y en la serie La Brava una pendiente de  $-20.301$  mg/L/año, ambas resultan con ajuste lineales de considerable correspondencia a un modelo lineal con pendiente significativamente distinto a cero, visto a partir de un  $r^2$  de 0,4179 y 0,5884, respectivamente, y un p-valor  $< 0,001$  (Wtest) en ambos casos.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-41), se realizó el análisis con los puntos de muestreo LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26, ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones ( $n=76$ ). El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,05$ , utilizando los datos del período 1996-2016. Posteriormente, se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, como es el caso de LBLB03 y LBLP03 con un p-valor  $< 0,05$ , a su vez, se observaron diferencias significativas entre los puntos de muestreo LBLP02 Y LBLB03 con un p-valor  $< 0,05$ .

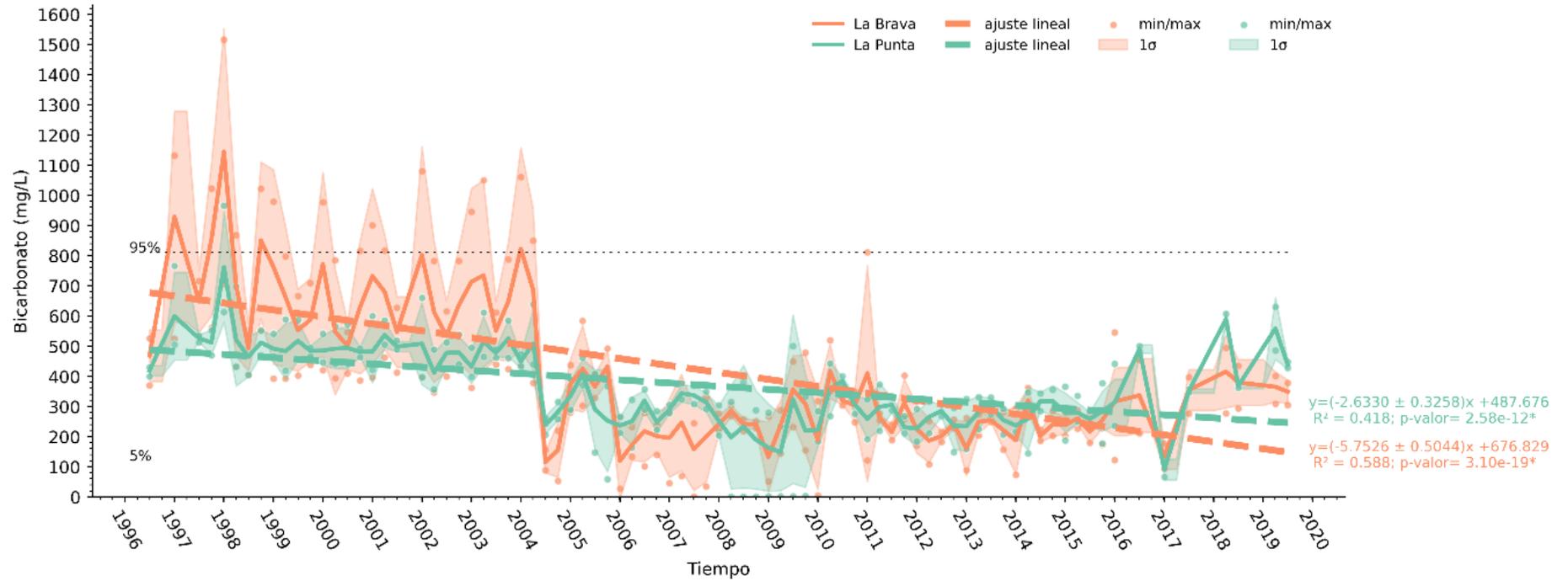


Figura 6-42 Análisis temporal y espacial de bicarbonato de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

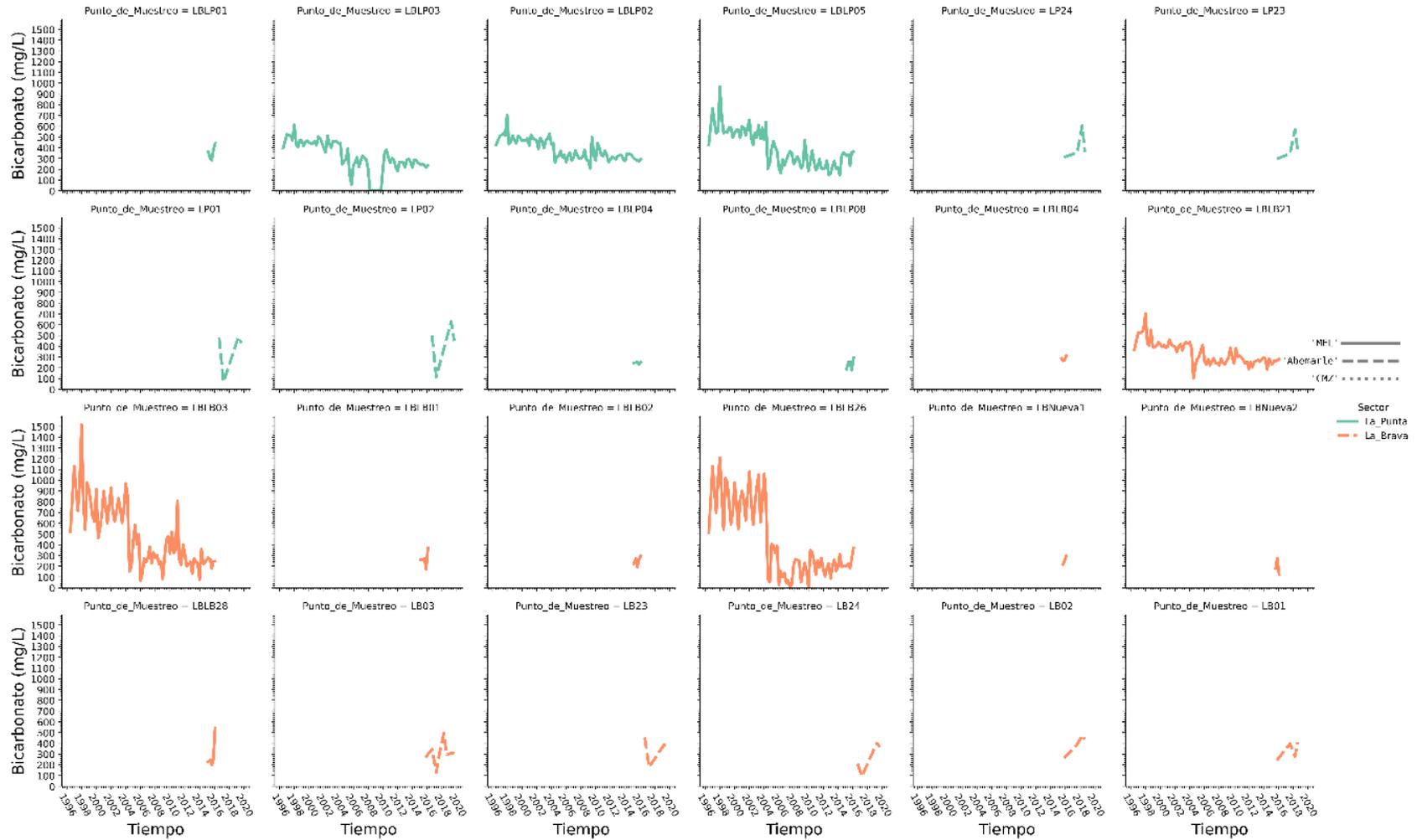


Figura 6-43 Análisis temporal de bicarbonato por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Calcio Disuelto (mg/L)**

Para los análisis de concentraciones de calcio disuelto, se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-44), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una tendencia a la disminución de las concentraciones de calcio disuelto hacia el presente en La Brava. El mínimo reportado (12 mg/L) en primavera 2000 en La Punta y el máximo (5700 mg/L) en invierno 1996 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que ningún sistema lagunar muestra un coeficiente de determinación mayor 0,10 para las series temporales de concentraciones de calcio disuelto. Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-47), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo (LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26; todas con n=76).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, el KW test arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando los datos del período 1996-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-34.

Tabla 6-34 Diferencias en puntos de muestreo de calcio disuelto.

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB21	2,27E-19	LBLB21
LBLP02	1,89E-27	LBLP02
LBLP03	5,15E-27	LBLP03
LBLP05	3,38E-05	LBLP05
LBLB26	2,46E-25	LBLB26
LBLP05	1,23E-05	LBLP05
LBLP02	1,75E-34	LBLP02
LBLP03	5,5E-34	LBLP03
LBLP05	2,89E-08	LBLP05
LBLP05	4,08E-10	LBLP05
LBLP05	6,94E-10	LBLP05

Fuente: Elaboración propia.

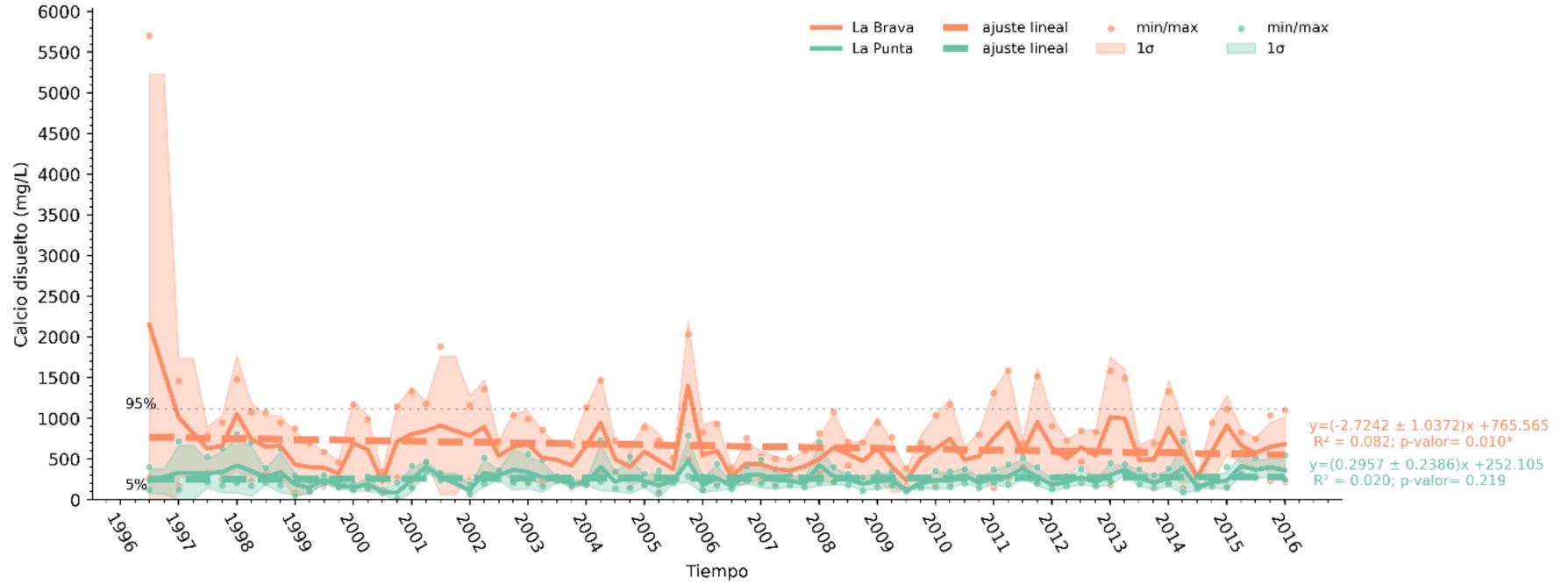


Figura 6-44 Análisis temporal y espacial de calcio disuelto de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

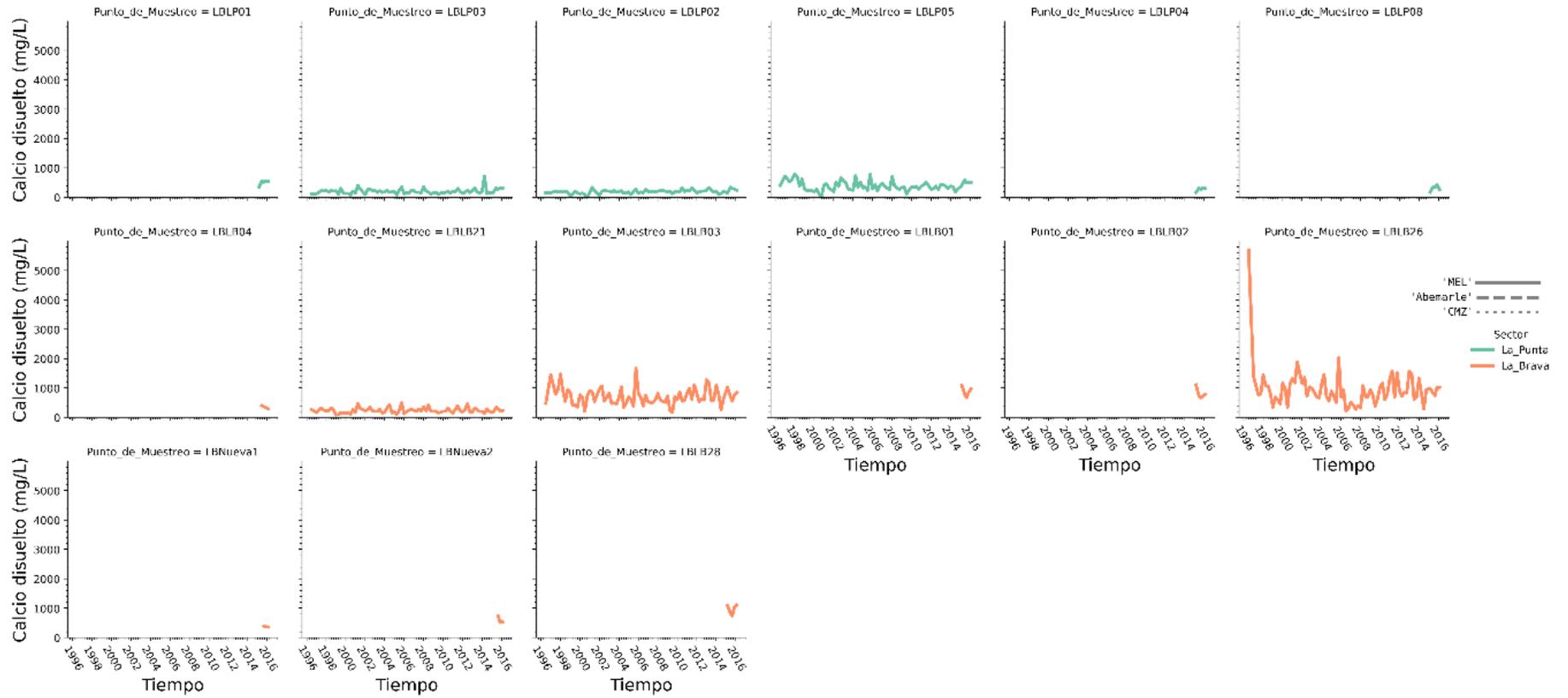


Figura 6-45 Análisis temporal de calcio disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Cloruro (mg/L)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-46), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una tendencia a la disminución de las concentraciones de cloruro hacia el presente, tanto en La Brava como en la Punta. A su vez, se puede observar un pulso de aumento en el año 2019 en ambos sistemas lagunares. El valor mínimo reportado (13 mg/L) en otoño 2002 en La Punta y el anómalo máximo (15025 mg/L) en verano 1997 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que la Laguna La Punta muestra una tendencia al aumento de concentraciones de cloruro hacia el presente (pendiente = +480 mg/L/año), la que resulta significativa con un  $r^2 = 0,2223$  y un p-valor  $< 0,001$  (Wtest). Por su parte, La Brava muestra una tendencia a la baja en sus concentraciones de cloruro (pendiente = -925,48 mg/L/año), la que resulta significativa con un  $r^2 = 0,6044$  y un  $p < 0,001$  (Wtest).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-49), el KWtest (considerando LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26; todas con  $n=76$ ) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algunos de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando los datos del período 1996-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-35.

Tabla 6-35 Diferencias en puntos de muestreo de cloruro

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	5,78E-16
LBLB03	LBLP02	3,68E-47
LBLB03	LBLP03	2,19E-31
LBLB03	LBLP05	9,14E-08
LBLB21	LBLB26	6,86E-19
LBLB21	LBLP02	2,92E-09
LBLB21	LBLP03	0,001816
LBLB21	LBLP05	0,018386
LBLB26	LBLP02	2,98E-52
LBLB26	LBLP03	1,52E-35
LBLB26	LBLP05	1,16E-09

Fuente: Elaboración propia.

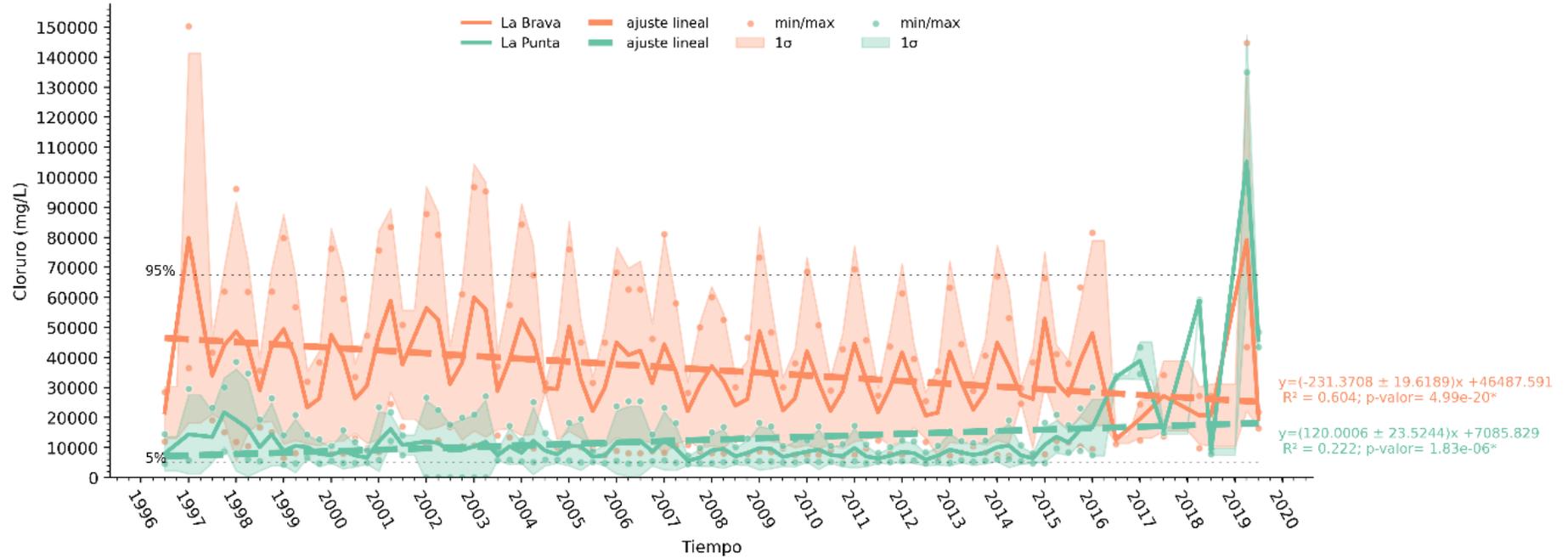


Figura 6-46 Análisis temporal y espacial de cloruro de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

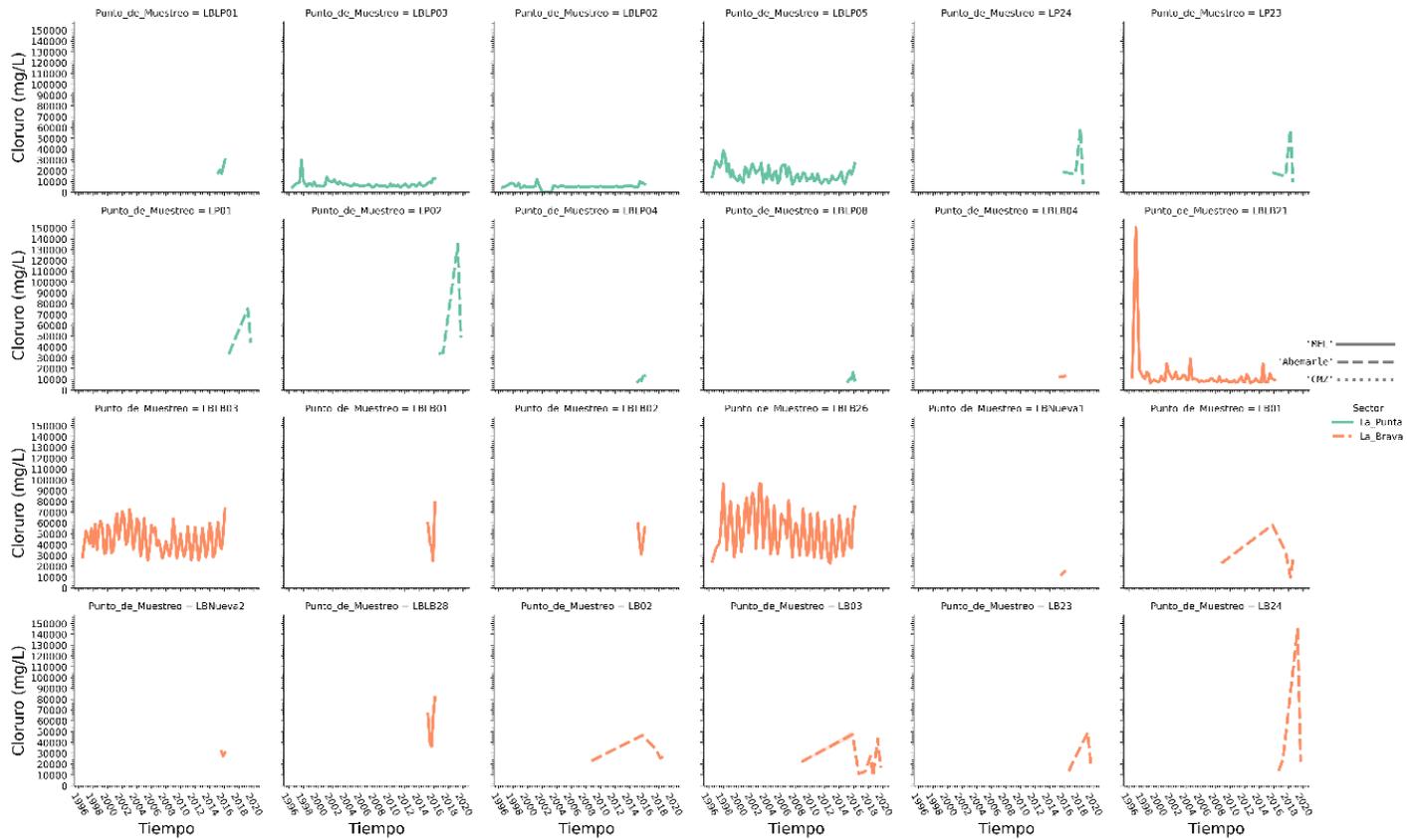


Figura 6-47 Análisis temporal de cloruro por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Fluoruro (mg/L)**

Los valores de fluoruro reportados por Minera Escondida son a partir de 2010 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones de cada año, se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-48), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de salinidad de La Brava presenta el mismo patrón de variación hasta el año 2016, con promedios mayores que los de La Punta de manera continua, difiriendo ambos conjuntos de manera significativa con p-valor  $< 0,001$  (MWtest).

Los valores de fluoruro muestran una leve tendencia al aumento en La Punta y en mayor proporción en La Brava hacia el presente, además de mostrar también la variabilidad estacional ya registrada en los parámetros *in situ*. El mínimo reportado (0,1 mg/L) en invierno 2012 y el máximo (1,6 mg/L) en invierno 2019 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo el sistema de Laguna La Brava muestran una baja pero considerable correspondencia con un modelo lineal, además de una pendiente significativamente distinta a cero para la serie de la concentración de fluoruro. El sistema de La Punta con respecto a la concentración de fluoruro hacia el presente presenta un coeficiente de determinación inferior a 0,10 para la regresión lineal. Para La Brava se obtuvo entonces una pendiente negativa de -0,0195 mg/L/año. El coeficiente de determinación para la Punta es  $r^2 = 0,004$  y un p-valor  $> 0,05$  (Wtest), en tanto para La Brava resultó con  $r^2 = 0,2488$  y un p-valor  $< 0,001$ .

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (considerando LBLP03 n=45, LBLP02 n=45, LBLP05 n=45, LBLB21 n=38, LBLB03 n=32 y LBLB26 n=18), todos los macroelementos presentaron un p-valor  $< 0,05$  en el KWtest, excepto fluoruro que no se presenta suficiente continuidad de la serie temporal, por lo que no se puede determinar correctamente con los datos existentes si puntos de muestreo difieren significativamente entre sí.

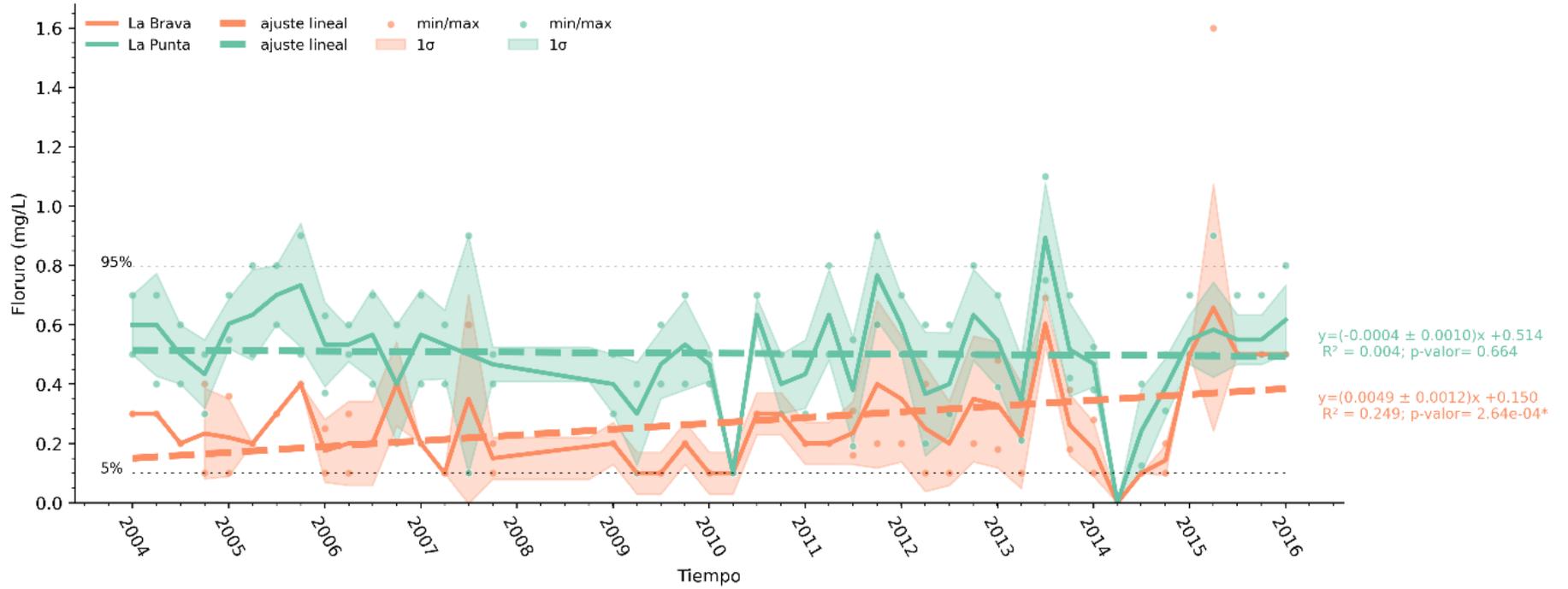


Figura 6-48 Análisis temporal y espacial de fluoruro de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

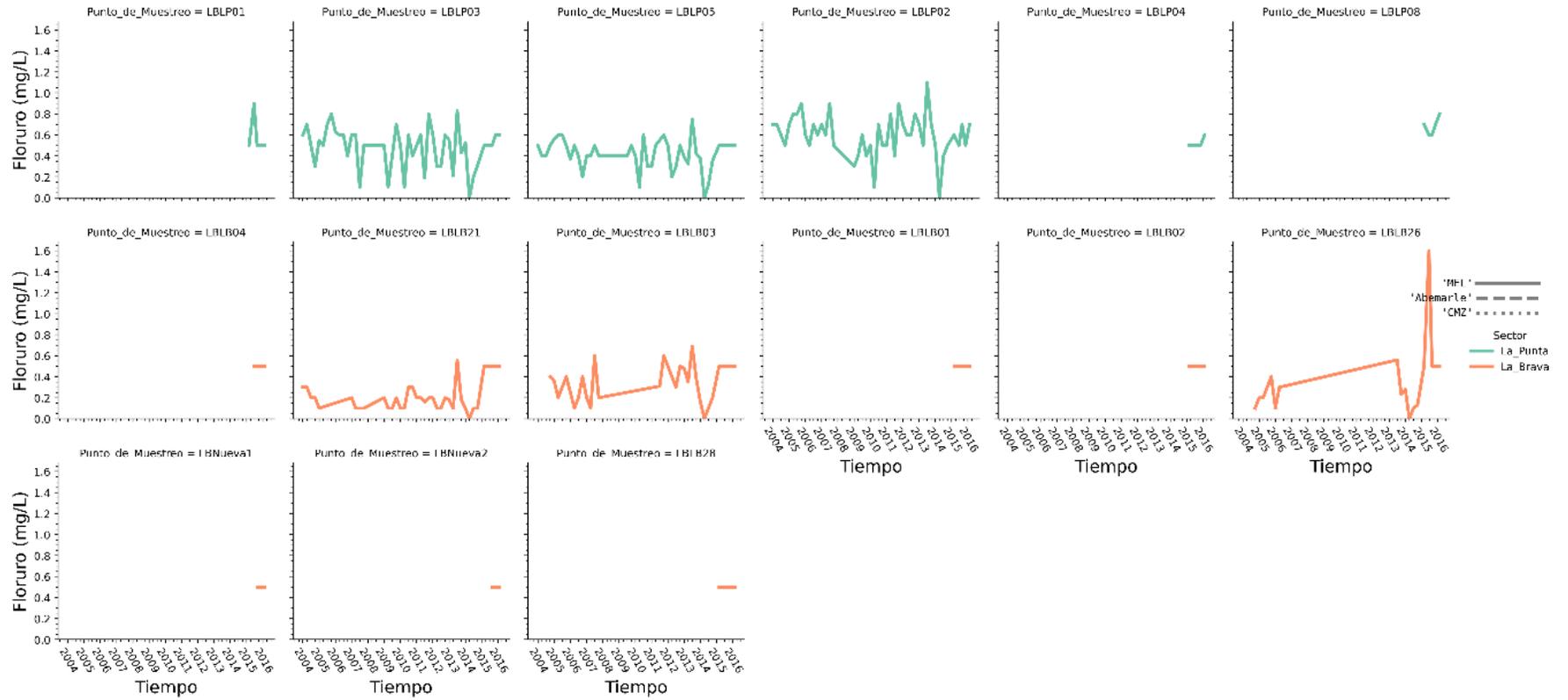


Figura 6-49 Análisis temporal de fluoruro por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Magnesio Disuelto (mg/L)**

Las concentraciones de magnesio disuelto se analizaron a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-50), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de magnesio disuelto presenta tendencia a la baja a partir del año 2003 para ambas lagunas. Ambos conjuntos difieren estadísticamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest). Por otra parte, ambas series de tiempo muestran variabilidad estacional, con mayores valores de concentraciones en invierno y menores en verano.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se evidencia que ambos coeficientes de determinación son inferiores a 0,10, por lo que no se puede hablar de una correspondencia a un modelo lineal para las series temporales de concentración de magnesio disuelto (La Brava  $r^2=0,069$ ; La Punta  $r^2=0,057$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (considerando LBLP03  $n=75$ , LBLP02  $n=76$ , LBLP05  $n=76$ , LBLB21  $n=76$ , LBLB03  $n=76$  y LBLB26  $n=76$ ; Figura 6-53), el KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algunos de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando los datos del período 1996-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-36.

Tabla 6-36 Diferencias en puntos de muestreo de magnesio disuelto

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB21	LBLB21	8,92E-13
LBLP02	LBLP02	1,05E-42
LBLP03	LBLP03	1,22E-28
LBLP05	LBLP05	3,98E-09
LBLB26	LBLB26	7,5E-16
LBLP02	LBLP02	8,05E-10
LBLP03	LBLP03	0,000377
LBLP02	LBLP02	2,33E-48
LBLP03	LBLP03	2,87E-33
LBLP05	LBLP05	1,13E-11
LBLP03	LBLP03	0,03528

Fuente: Elaboración propia.

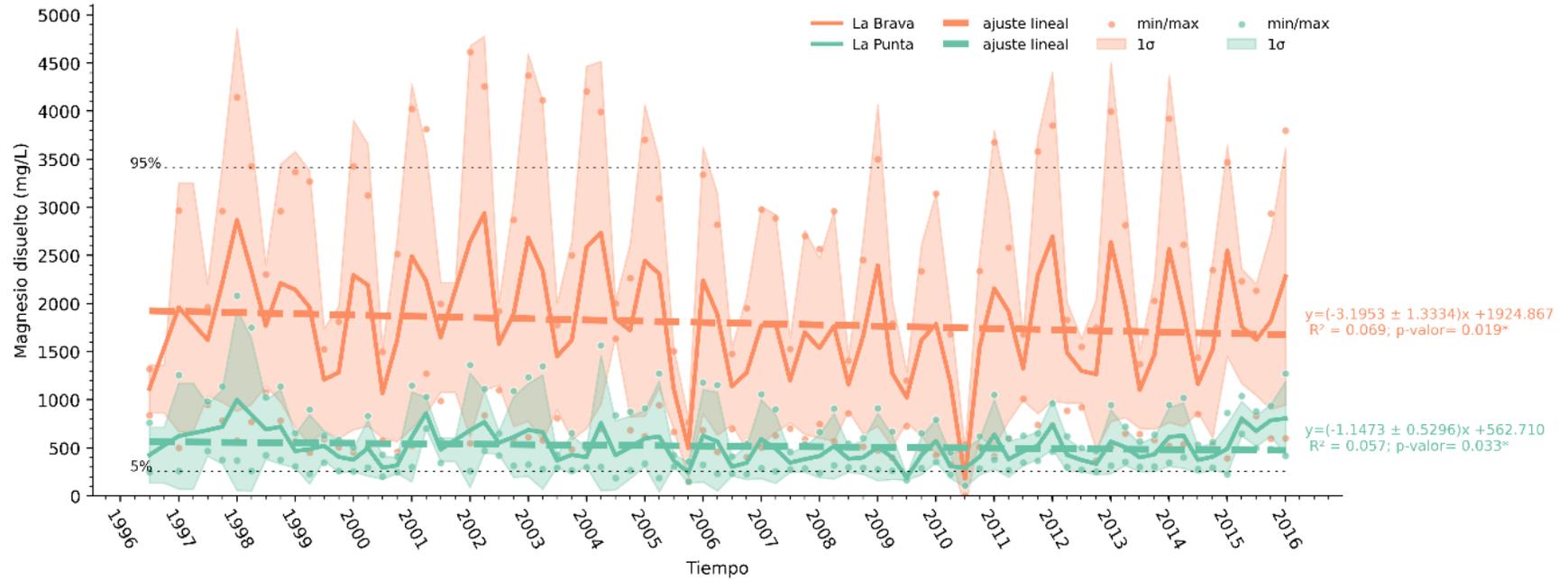


Figura 6-50 Análisis temporal y espacial de magnesio disuelto de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

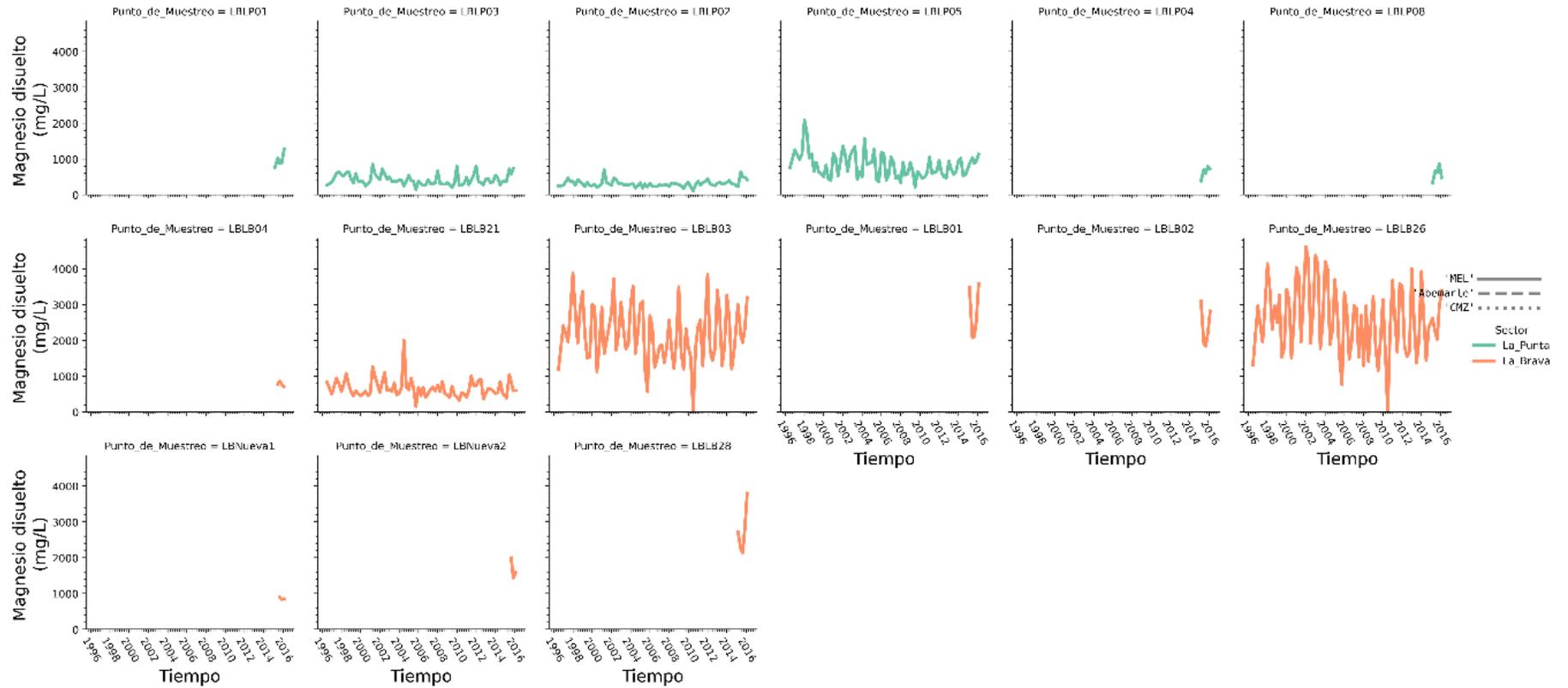


Figura 6-51 Análisis temporal de magnesio disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Potasio Disuelto (mg/L)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-52), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de concentración de potasio disuelto presenta tendencia a la baja para ambas lagunas. Ambos conjuntos difieren significativamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest). Por otra parte, ambas series de tiempo muestran variabilidad estacional, con mayores valores de concentraciones en invierno y menores en verano.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que presentan disminuciones significativas de concentraciones de potasio disuelto. Se obtiene también que la disminución observada tiene una pendiente para la serie de La Punta de  $-23,6816$  mg/L/año y en La Brava una pendiente de  $-116.917$  mg/L/año. Ambas regresiones lineales presentan correspondencia a un modelo lineal y pendientes significativamente distintas a cero, dado los  $r^2$  de  $0,2773$  (La Punta) y  $0,5661$  (La Brava), y ambos p-valor  $< 0,001$  (Wtest).

Posteriormente, al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (considerando LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26; todas con  $n=76$ ; Figura 6-55), el KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algunos de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando los datos del período 1996-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-37.

Tabla 6-37 Diferencias en puntos de muestreo de potasio disuelto

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	3,82E-15
LBLB03	LBLP02	6,89E-39
LBLB03	LBLP03	5,93E-28
LBLB03	LBLP05	5,02E-07
LBLB21	LBLB26	2,72E-14
LBLB21	LBLP02	1,76E-06
LBLB21	LBLP03	0,00964
LBLB21	LBLP05	0,016877
LBLB26	LBLP02	1,8E-37
LBLB26	LBLP03	9,13E-27
LBLB26	LBLP05	1,7E-06

Fuente: Elaboración propia

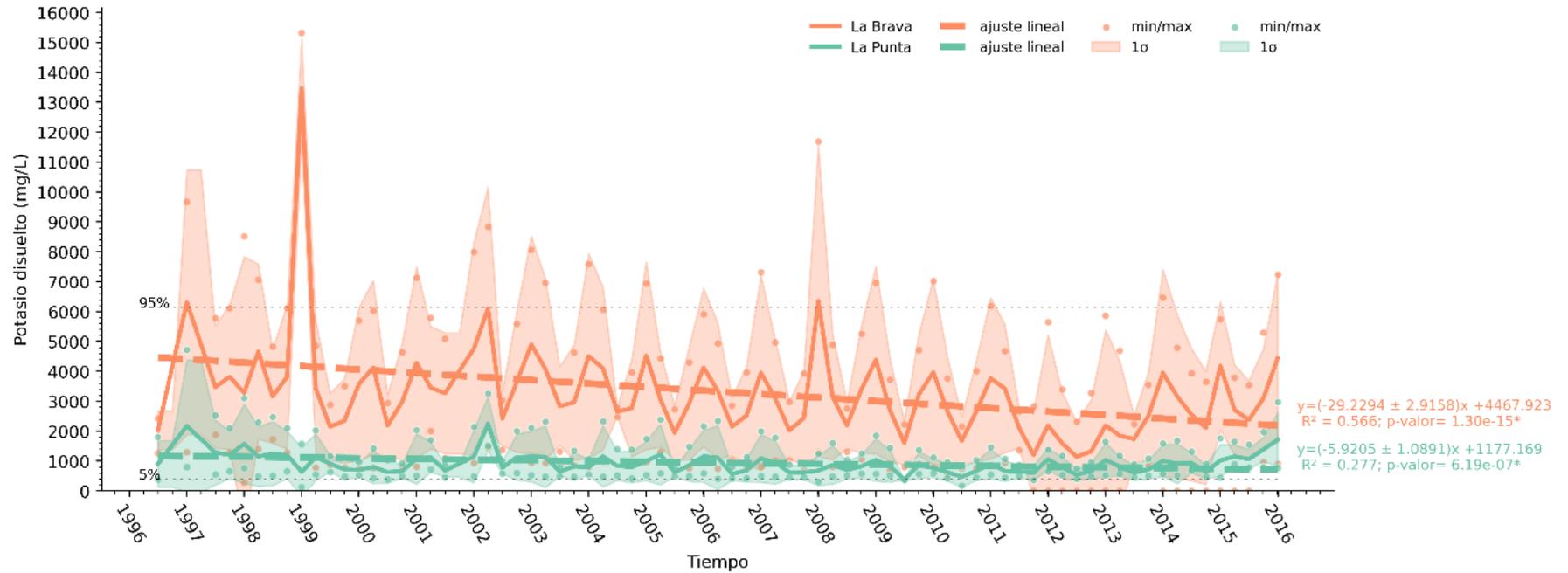


Figura 6-52 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

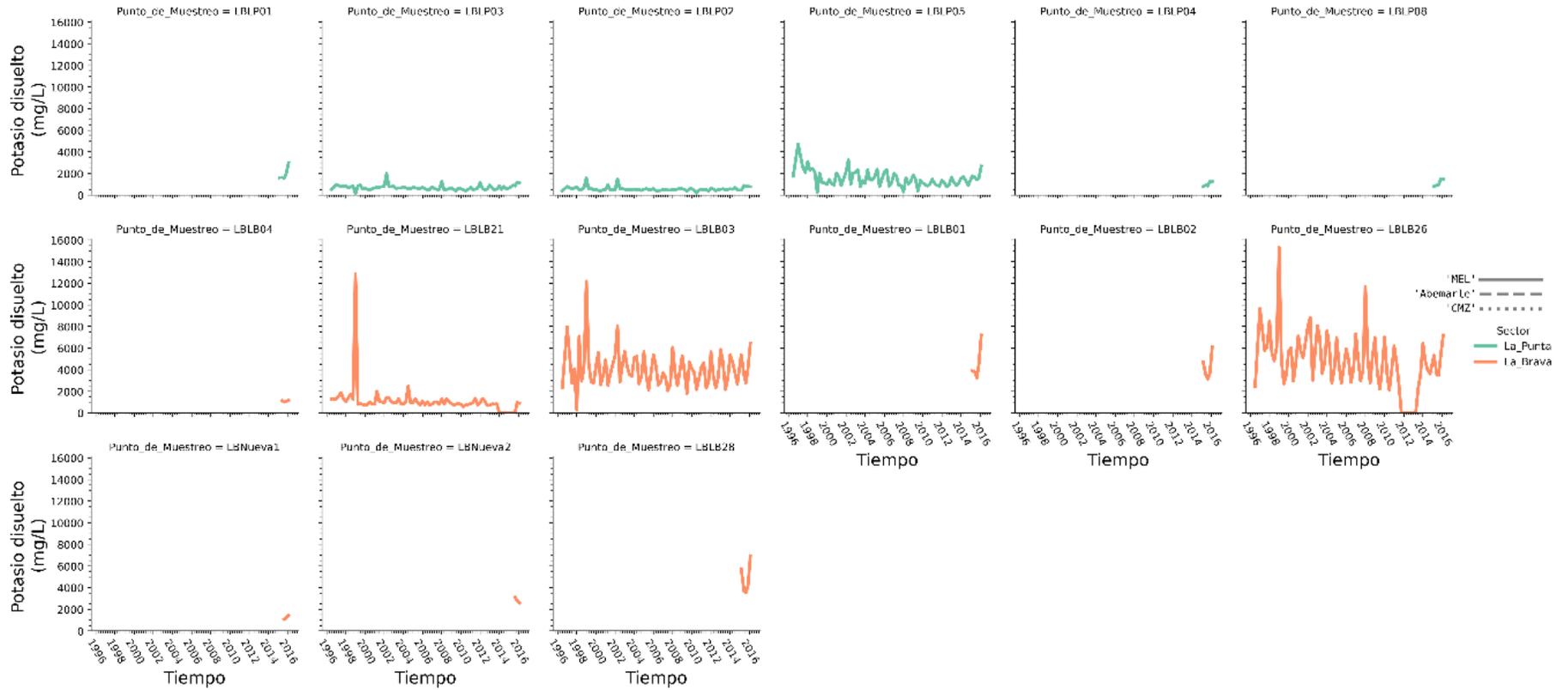


Figura 6-53 Análisis temporal de potasio disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Sodio Disuelto (mg/L)**

Se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-54), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, donde se observó una leve tendencia al aumento de las concentraciones de sodio disuelto hacia el presente tanto en La Punta como en el sistema lagunar La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie de Laguna La Punta obtiene un coeficiente de determinación superior a 0,10 y así una pendiente para el ajuste lineal significativamente negativa para la concentración de sodio disuelto hacia el presente (pendiente = -140,0676 mg/L/año;  $r^2 = 0,3593$ ; Wtest p-valor < 0,001).

El KWtest (considerando LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26; todas con n=76) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor < 0,001, utilizando los datos del período 1996-2016.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-57), se realizó el análisis con los puntos de muestreo LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26, ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones (n=76). Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-38.

Tabla 6-38 Diferencias en puntos de muestreo de sodio disuelto

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	2,84E-15
LBLB03	LBLP02	2,84E-42
LBLB03	LBLP03	3,04E-31
LBLB03	LBLP05	3,54E-08
LBLB21	LBLB26	3,98E-17
LBLB21	LBLP02	8,68E-08
LBLB21	LBLP03	0,001023
LBLB26	LBLP02	2,24E-45
LBLB26	LBLP03	6,6E-34
LBLB26	LBLP05	1,96E-09
LBLP02	LBLP05	1,15E-14

Fuente: Elaboración propia.

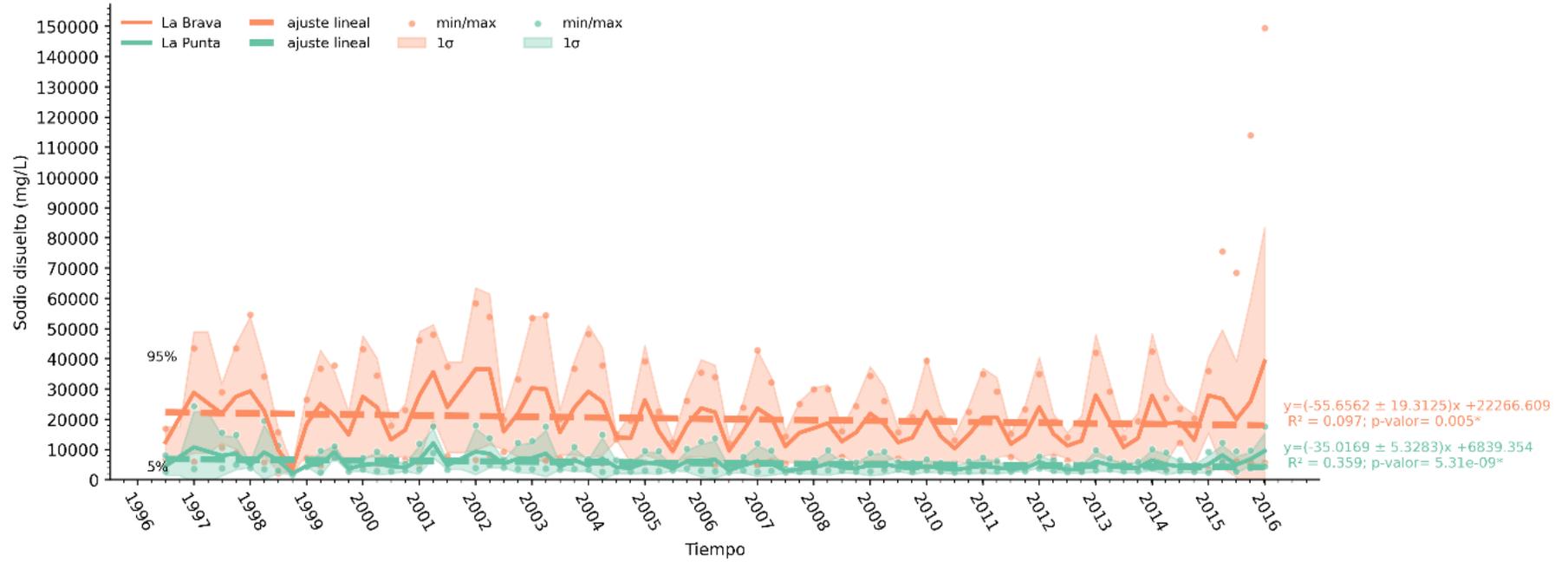


Figura 6-54 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

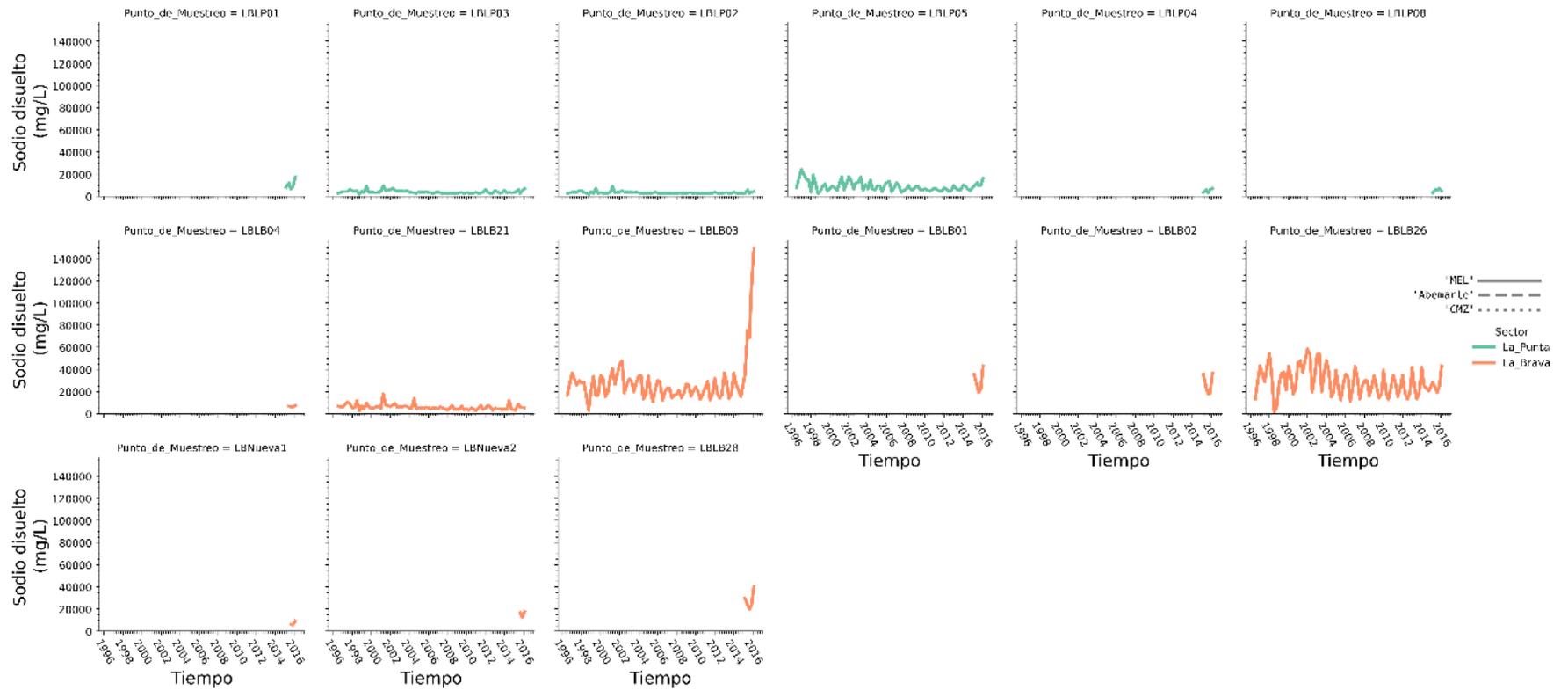


Figura 6-55 Análisis temporal de sodio disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Sulfato (mg/L)**

Para las concentraciones de sulfato, se analizó el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-56), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de sulfato de La Brava presenta en promedio valores mayores que los de La Punta en el período de 1996 a 2016 de manera continua. Además, ambos sistemas lagunares muestran una tendencia al aumento de las concentraciones de sulfato hacia el presente. Ambos conjuntos difieren estadísticamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest).

Por otra parte, ambas series de tiempo muestran variabilidad estacional, con mayores concentraciones en verano y menores en invierno, comportamiento coincidente con la variabilidad de las curvas de la temperatura.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que ambas lagunas muestran una tendencia de aumento significativo de concentración de sulfato, la serie de La Punta con una pendiente de 85,805 mg/L/año hacia el presente, y la serie de La Brava con una pendiente positiva de 95.232 mg/L/año. Esto se afirma según los valores de  $r^2 = 0,3613$  y p-valor  $< 0,001$  (Wtest) para La Punta y  $r^2 = 0,3128$  y p-valor  $< 0,001$  (Wtest) para la Brava.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (considerando LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26; todas con  $n=76$ ; Figura 6-59), el KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ . Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-38.

Tabla 6-39 Diferencias en puntos de muestreo de sulfato

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	7,53E-06
LBLB03	LBLP02	1,08E-26
LBLB03	LBLP03	3,71E-19
LBLB03	LBLP05	2,47E-08
LBLB21	LBLB26	1,27E-10
LBLB21	LBLP02	1,06E-08
LBLB21	LBLP03	6,25E-05
LBLB26	LBLP02	1,2E-36
LBLB26	LBLP03	1,11E-27
LBLB26	LBLP05	4,48E-14
LBLP02	LBLP05	3,95E-06

Fuente: Elaboración propia.

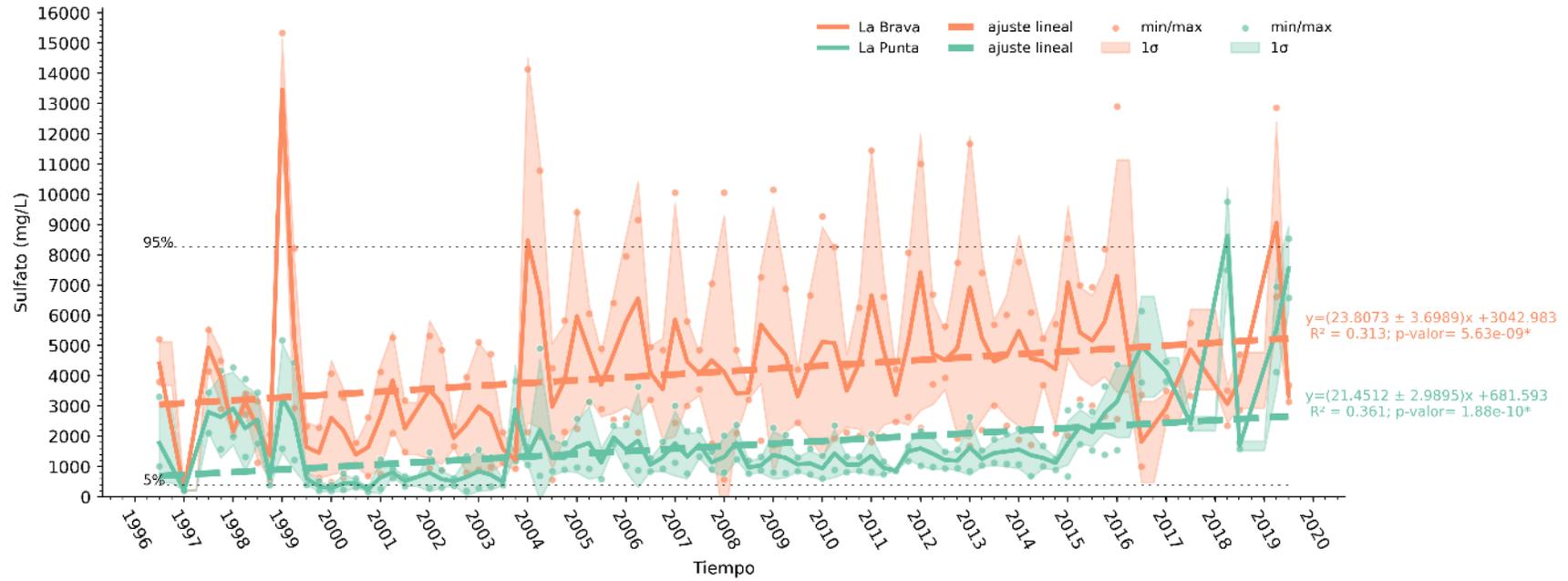


Figura 6-56 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

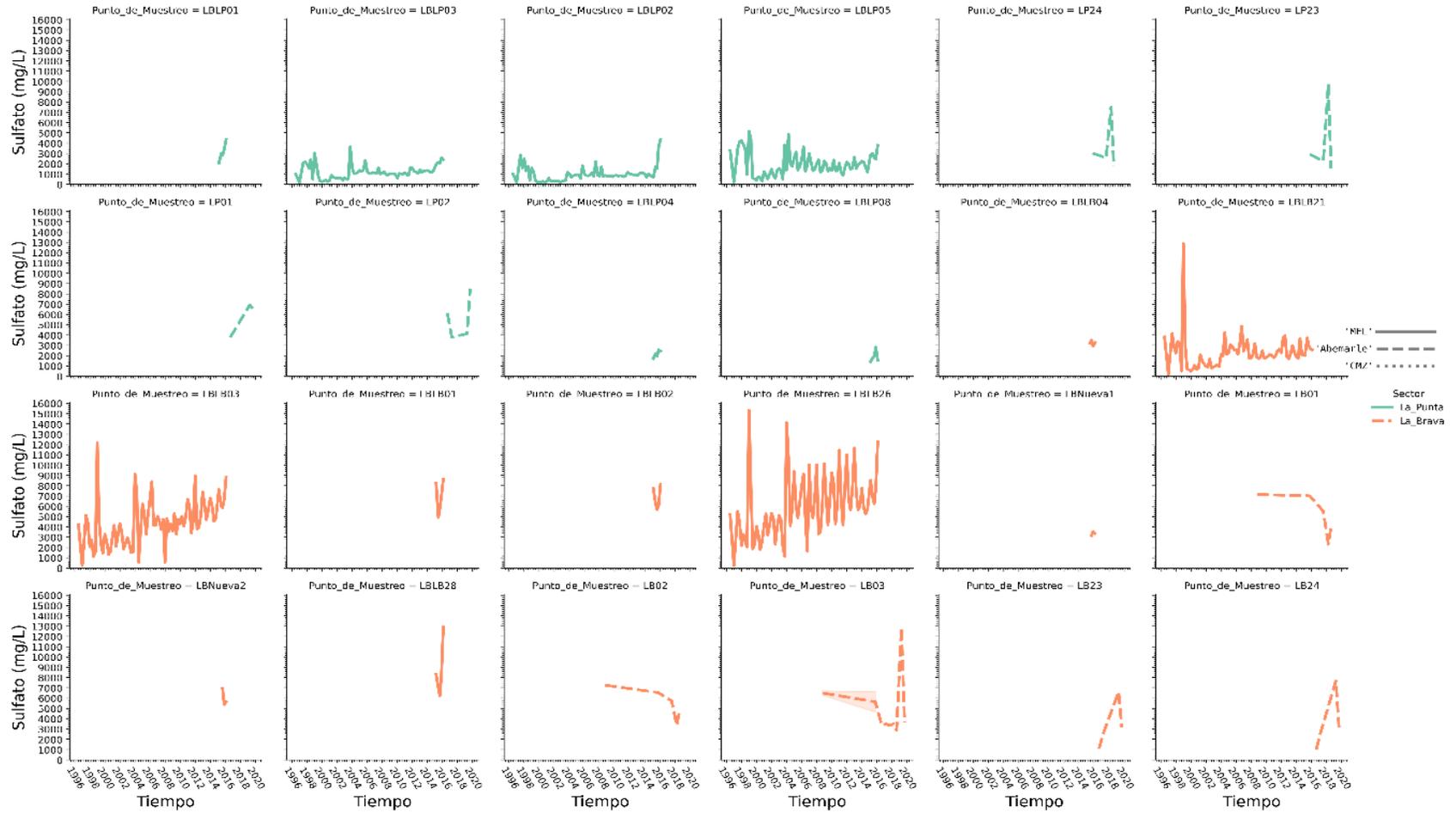


Figura 6-57 Análisis temporal de sulfato por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.1.10. Metales de lagunas superficiales

La determinación química de los metales en las lagunas superficiales fue obtenidos a través de la data generada por Minera Escondida a partir del año 1996 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones del año, Albemarle desde el año 2013 hasta 2019, con muestreos semestrales en invierno y verano, y Minera Zaldívar, con muestreos en 2016 y 2017. Cabe destacar que en estos últimos no hay continuidad respecto a los años.

Teniendo en cuenta la totalidad de los datos disponibles para los metales de lagunas superficiales, sin diferenciar origen de los datos, se obtienen los estadígrafos de la Tabla 6-40. Se observa una gran amplitud de la distribución de los datos al no discriminar entre empresa, puntos de muestreo, lagunas ni estación del año.

Tabla 6-40 Estadígrafos de metales en lagunas superficiales.

Parámetro	N observaciones	Promedio	SD	Mínima	Máxima	Moda	Mediana
Arsénico Disuelto (As mg/L)	350	3,798425239	4,079111827	0,0008	26,525	0,002	2,304
Boro Disuelto (B mg/L)	318	97,00050071	87,93121715	0,002	448	0,002	58,98915
Cadmio Disuelto (Cd mg/L)	356	0,000247895	0,000443623	0,000006	0,005	0,00003	0,00003
Cobre Disuelto (Cu mg/L)	355	0,005150361	0,007919037	0,00003	0,0948	0,005	0,004
Hierro Disuelto (Fe mg/L)	357	0,016058288	0,023738966	0	0,274	0,006	0,009
Litio Disuelto (Li mg/L)	207	117,3984086	128,3287527	0	1106	0,0003	61,7
Plomo Disuelto (Pb mg/L)	371	0,288626156	1,119457182	0	6,468	0,00003	0,001
Zinc Disuelto (Zn mg/L)	348	0,014266193	0,026831027	0	0,2302	0,0005	0,008

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se presentan los datos de manera espacial, por laguna (Tabla 6-41). Se observa que la Laguna La Punta registra el máximo de arsénico disuelto (19,40 mg/L), el mayor valor de boro disuelto (449 mg/L), valores máximos de cadmio disuelto (0,01 mg/L), registros máximos de cobre disuelto (0,09 mg/L). En tanto, los valores mínimos de hierro disuelto (0,01 mg/L), litio disuelto (0,01 mg/L), plomo disuelto (0,02 mg/L) y zinc disuelto (0,01 mg/L) se registran en la Laguna La Brava.

Tabla 6-41 Estadígrafos por laguna de metales

Parámetro	Arsénico Disuelto (mg/L)		Boro Disuelto (mg/L)		Cadmio Disuelto (mg/L)		Cobre Disuelto (mg/L)		Hierro Disuelto (mg/L)		Litio Disuelto (mg/L)		Plomo Disuelto (mg/L)		Zinc Disuelto (mg/L)	
	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP
N observaciones	44,00	32,00	164,00	154,00	182,00	174,00	182,00	173,00	181,00	176,00	108,00	99,00	194,00	177,00	178,00	170,00
Promedio	6,82	2,24	142,44	48,61	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	178,16	51,11	0,32	0,26	0,01	0,01
SD	4,55	1,05	100,15	27,67	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	151,41	32,84	1,10	1,14	0,02	0,03
Mínima	1,18	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máxima	19,40	4,75	448,00	181,10	0,01	0,00	0,09	0,02	0,20	0,27	1106,00	193,30	6,47	6,47	0,21	0,23
MWtest (p-valor)	1,96027E-12		8,83614E-15		0,34267263		0,001566208		0,48738086		0,012052686		1,29127E-09		0,47354821	
Dif.sig.	sí		sí		no		sí		no		sí		sí		no	

Fuente: Elaboración propia. Dif.sig: diferencia significativa; LP: La Punta; LB: La Brava

- **Arsénico Disuelto (mg/L)**

Se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-58), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una leve tendencia al aumento de las concentraciones de arsénico disuelto hacia el presente tanto en La Punta como en el sistema lagunar La Brava. El mínimo reportado (0,0008 mg/L) en otoño 2008 en La Punta y el máximo (26,52 mg/L) en primavera 2013 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que tanto las series de Laguna La Punta, como La Brava muestran una baja pero considerable correspondencia con un modelo lineal y una leve pendiente significativamente positiva de concentración de arsénico hacia el presente. Los valores para las pendientes son 0,0552 mg/L/año y 0,2744 mg/L/año, con un  $r^2$  de 0,1378 y 0,1636, con p-valor  $< 0,001$  (Wtest), respectivamente para La Punta y La Brava.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-59), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo (LBLP03 n=52, LBLP02 n=52, LBLP05 n=51, LBLB21 n=51, LBLB03 n=52 y LBLB26 n=52). El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando los datos del período 1996-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-42.

Tabla 6-42 Diferencias de puntos de muestro de arsénico disuelto

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	0,011054
LBLB03	LBLP02	1,35E-09
LBLB03	LBLP03	1,03E-05
LBLB03	LBLP05	0,020797
LBLB21	LBLB26	0,004618
LBLB26	LBLP02	1,94E-10
LBLB26	LBLP03	2,34E-06
LBLB03	LBLB21	0,011054
LBLB03	LBLP02	1,35E-09
LBLB03	LBLP03	1,03E-05
LBLB03	LBLP05	0,020797

Fuente: Elaboración propia.

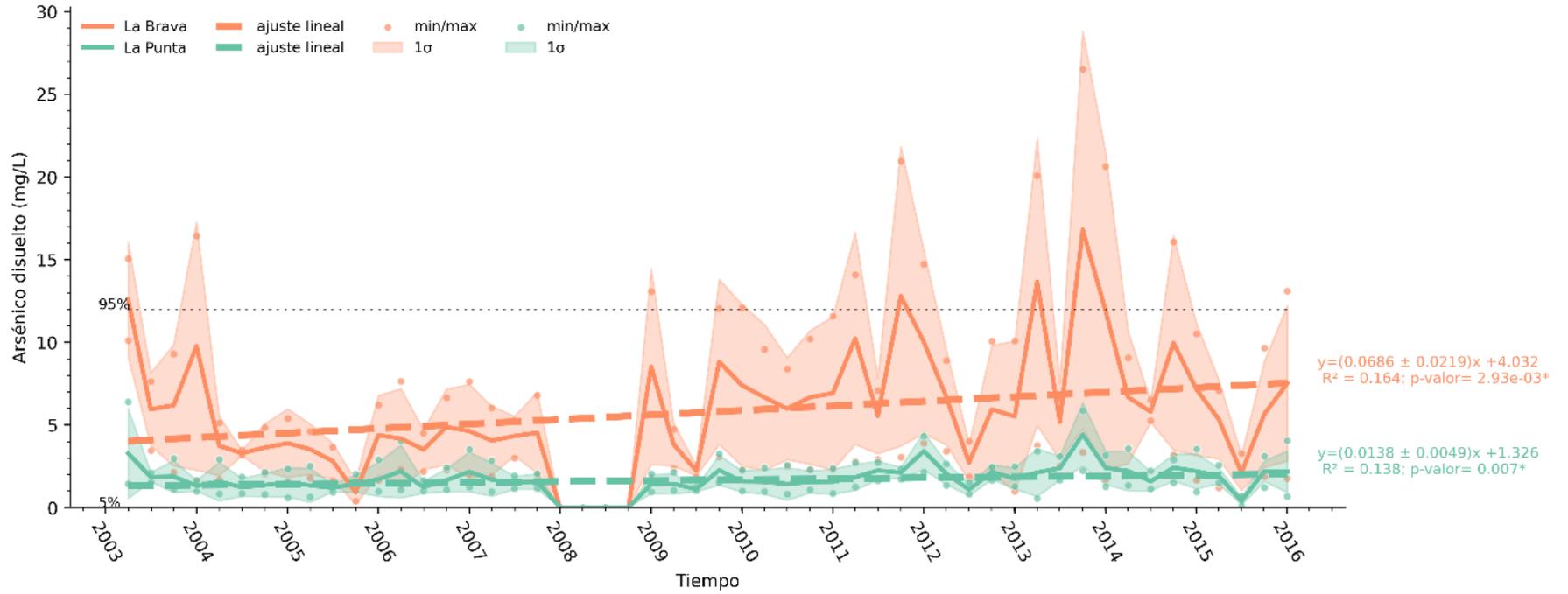


Figura 6-58 Análisis temporal y espacial de Arsénico disuelto de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar (± 1 σ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

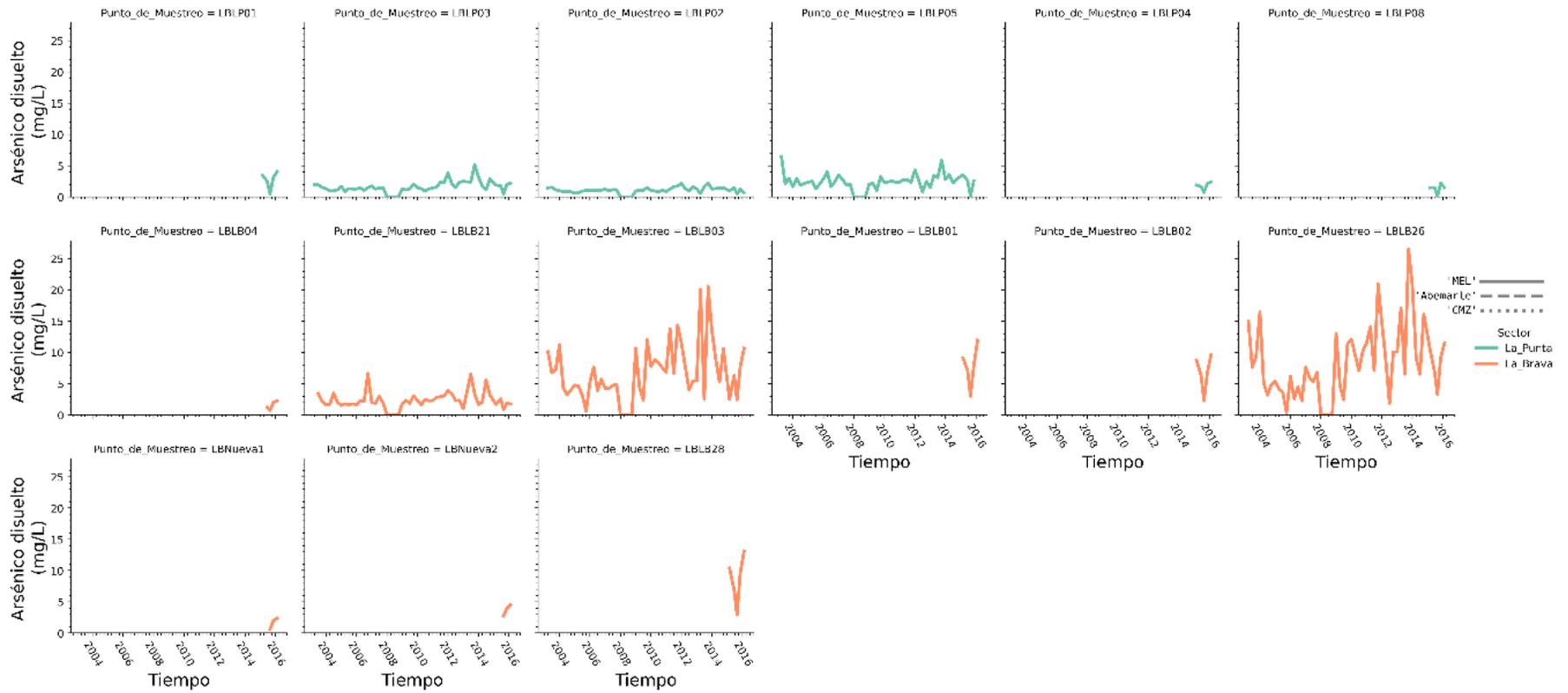


Figura 6-59 Análisis temporal de arsénico disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Boro Disuelto (mg/L)**

Se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-60), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una leve tendencia a la disminución de las concentraciones de boro disuelto hacia el presente tanto en La Punta como en el sistema lagunar La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo serie de Laguna La Punta muestra un coeficiente de determinación  $>0,10$ , así como una pendiente significativamente positiva concentración de boro disuelto hacia el presente (pendiente = 1.598 mg/L/año;  $r^2 = 0,3403$ ; p-valor  $< 0,001$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-63), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo (LBLP03 n=49, LBLP02 n=44, LBLP05 n=47, LBLB21 n=44, LBLB03 n=46 y LBLB26 n=49). El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando los datos del período 1996-2016.

Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-43.

Tabla 6-43 Diferencias en puntos de muestreo de boro disuelto

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	0,034187
LBLB03	LBLP02	1,45E-13
LBLB03	LBLP03	6,27E-19
LBLB03	LBLP05	8,75E-10
LBLB21	LBLB26	0,003005
LBLB21	LBLP02	3,64E-06
LBLB21	LBLP03	7,76E-10
LBLB21	LBLP05	0,001011
LBLB26	LBLP02	1,99E-16
LBLB26	LBLP03	2,65E-22
LBLB26	LBLP05	3,65E-12

Fuente: Elaboración propia.

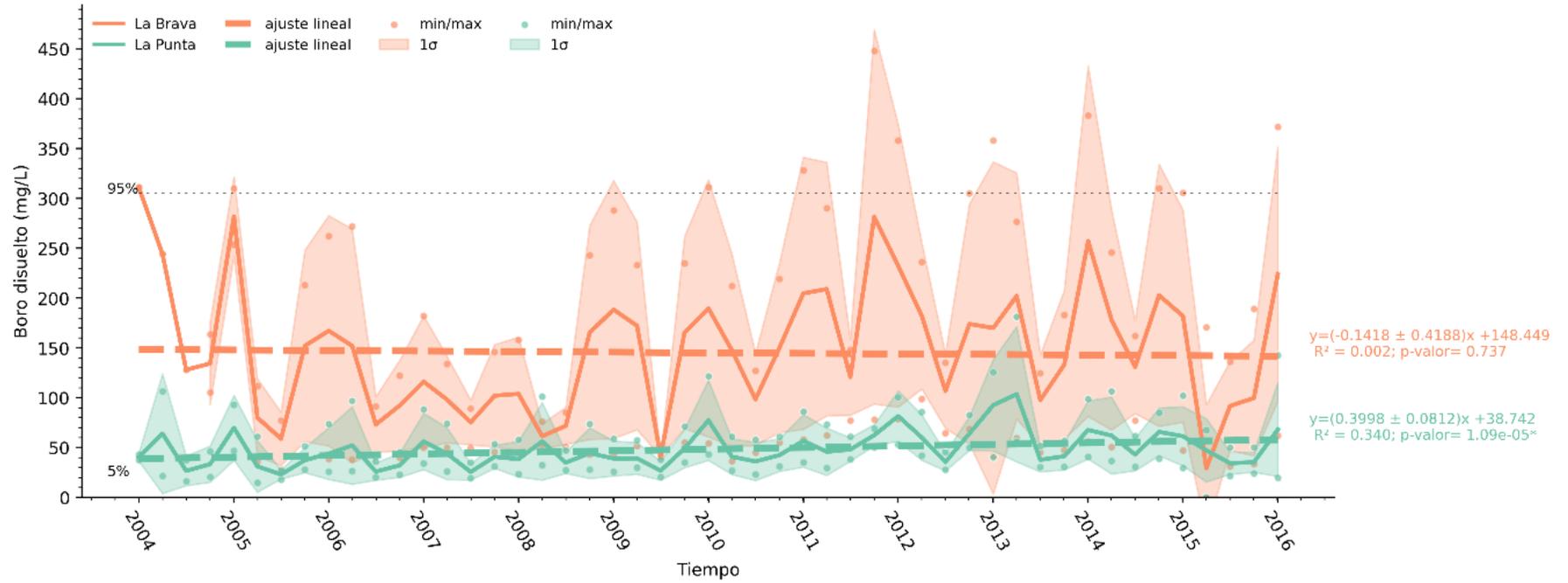


Figura 6-60 Análisis temporal y espacial de boro disuelto de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

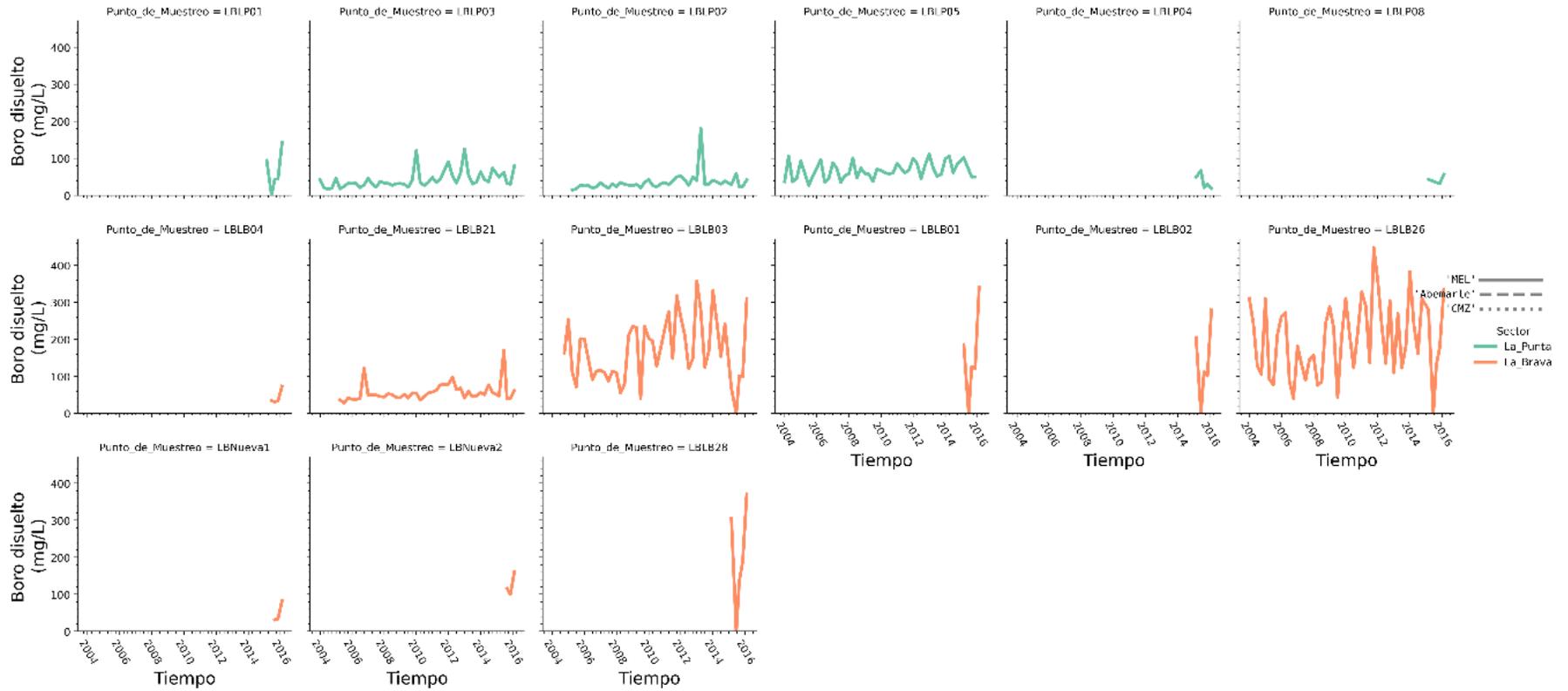


Figura 6-61 Análisis temporal de boro disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Cadmio Disuelto (mg/L)**

Los valores de cadmio disuelto reportados por Minera Escondida son a partir de 2010 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones de cada año, se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-62), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una leve tendencia al aumento, a su vez, la curva de cadmio disuelto de La Brava presenta el mismo patrón de variación hasta el año 2016, con promedios mayores que los de La Punta de manera continua. No hay evidencia de diferencias significativas entre ambos conjuntos ( $p$ -valor  $> 0,05$  MWtest).

Los valores de cadmio disuelto muestran una leve tendencia al aumento en La Punta y en mayor proporción en La Brava hacia el presente, además de mostrar también la variabilidad estacional ya registrada en los parámetros *in situ*. El mínimo reportado (0,000006 mg/L) en invierno 2014 y el máximo (0,0005 mg/L) en otoño 2015 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que ambas lagunas muestran una tendencia de aumento significativo de concentración de cadmio disuelto. La serie de La Punta presenta una pendiente significativamente positiva de 0,00004 mg/L/año hacia el presente ( $r^2 = 0,4124$ ; Wtest  $p$ -valor  $< 0,001$ ), a su vez, La Brava presenta una pendiente significativamente positiva de 0,00005 mg/L/año ( $r^2 = 0,3932$ ; Wtest  $p$ -valor  $< 0,001$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-63), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo (LBLP03  $n=53$ , LBLP02  $n=53$ , LBLP05  $n=53$ , LBLB21  $n=51$ , LBLB03  $n=53$  y LBLB26  $n=53$ ). El ANOVA de una vía arroja como resultado que no se determinan diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un  $p$ -valor  $> 0,05$ , utilizando los datos del período 2010-2016. Se pudo ocupar ANOVA para este conjunto de datos ya que los puntos de muestreo para esta variable presentan normalidad (Test de Shapiro-Wilk, todo  $p$ -valor  $> 0,05$ ) y homocedasticidad (Test de Bartlett  $p$ -valor  $> 0,05$ ).

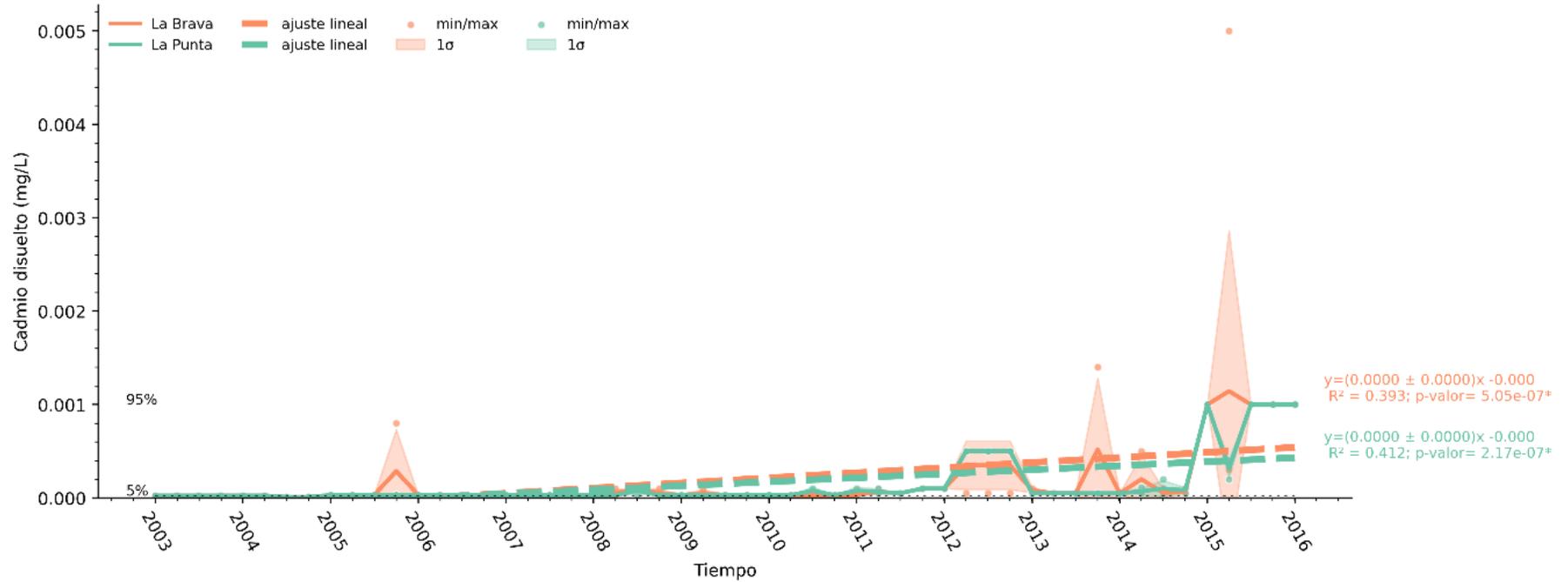


Figura 6-62 Análisis temporal y espacial de cadmio disuelto de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

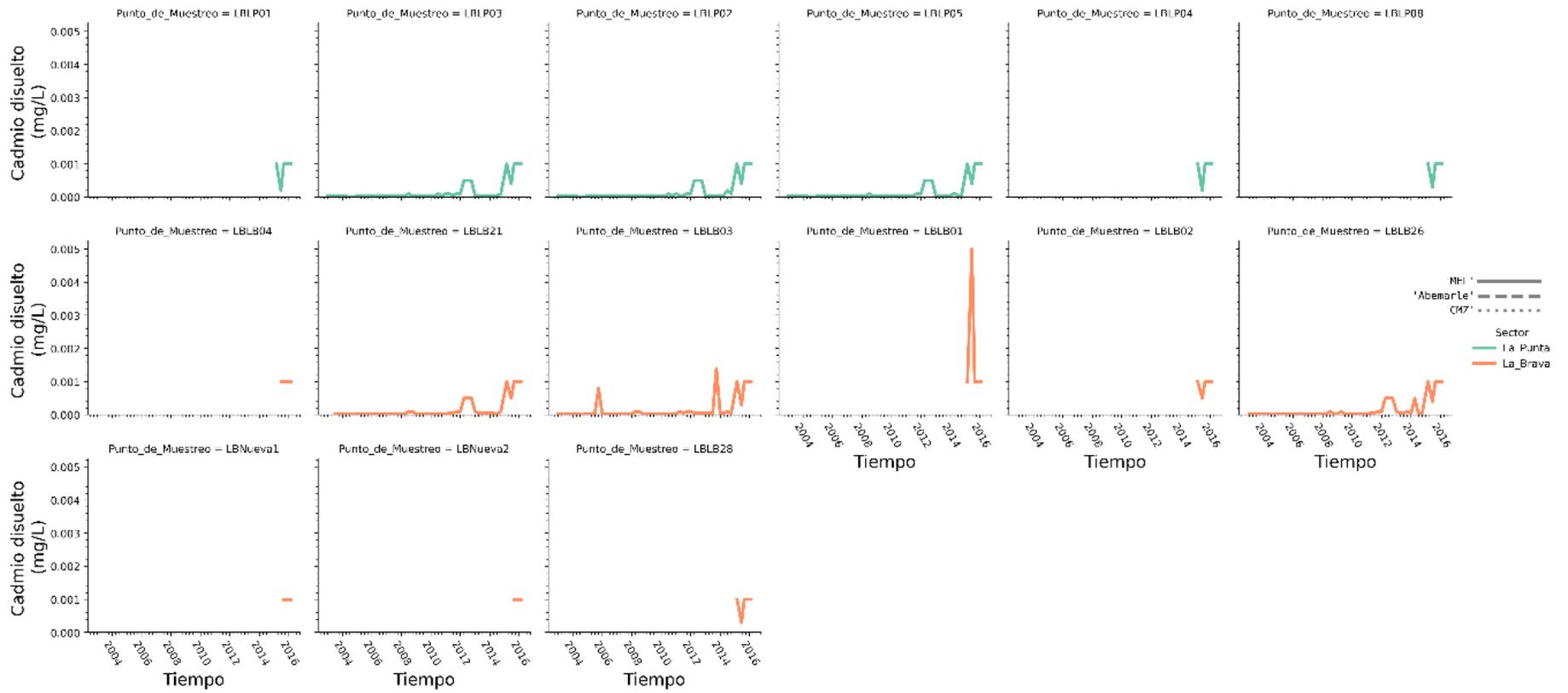


Figura 6-63 Análisis temporal de cadmio disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Cobre Disuelto (mg/L)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-64), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó un leve aumento en la tendencia de concentraciones de cobre disuelto, tomando datos desde el 2003 hasta el 2016.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que la serie de Laguna La Punta muestra una leve tendencia al aumento de concentración de cobre disuelto hacia el presente (pendiente = 0,00023 mg/L/año), resultando con un considerable coeficiente de determinación y un pendiente significativamente distinto a cero ( $r^2 = 0,636$ ; Wtest  $p < 0,001$ ). La serie de La Brava por su parte, también resulta significativa ( $r^2 = 0,1662$ ; Wtest  $p\text{-valor} < 0,05$ ) con la pendiente = 0,00033 mg/L/año.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-65), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo. Este análisis se realizó con los puntos de muestreo LBLP03 (n=53), LBLP02 (n=53), LBLP05 (n=53), LBLB21 (n=51) y LBLB03 (n=53), LBLB26 (n=53), ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones. El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un  $p\text{-valor} < 0,05$  utilizando los datos del período 2003-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, obteniendo como resultado que LBLB26 y LBLP02 presentan diferencias significativas con un  $p\text{-valor} < 0,05$ .

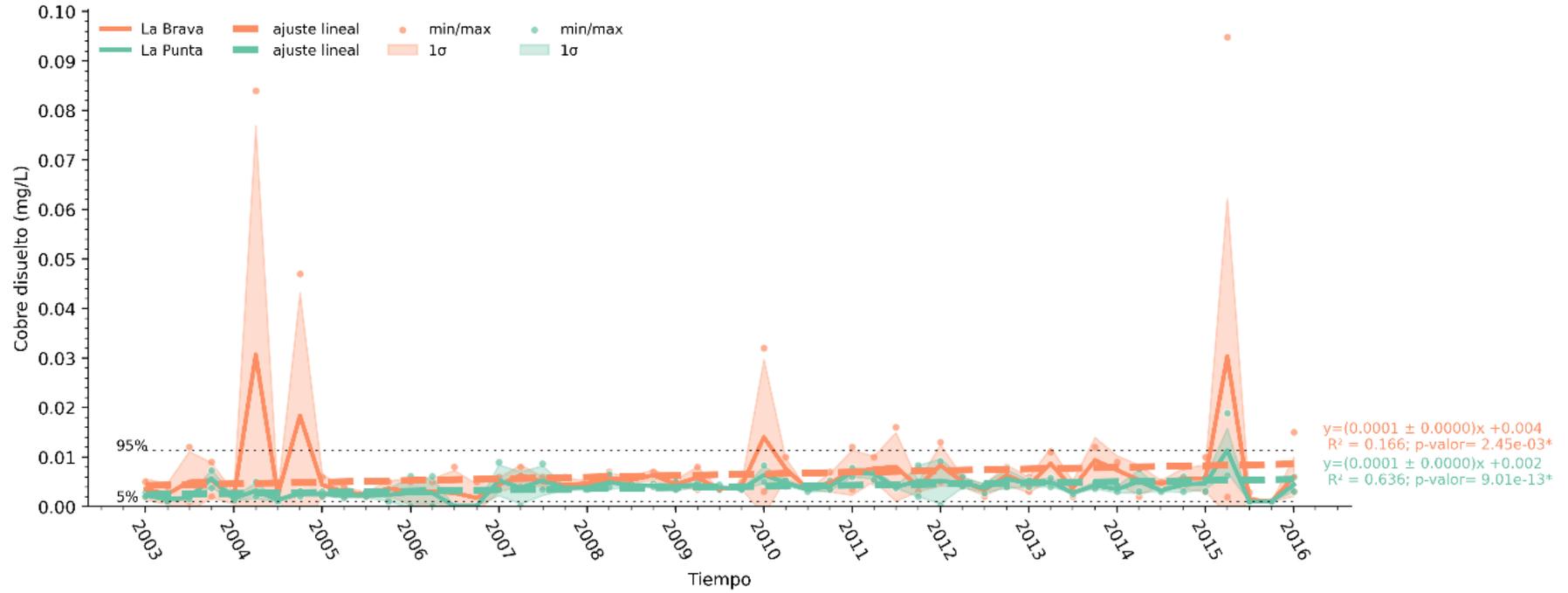


Figura 6-64 Análisis temporal y espacial de cobre disuelto de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

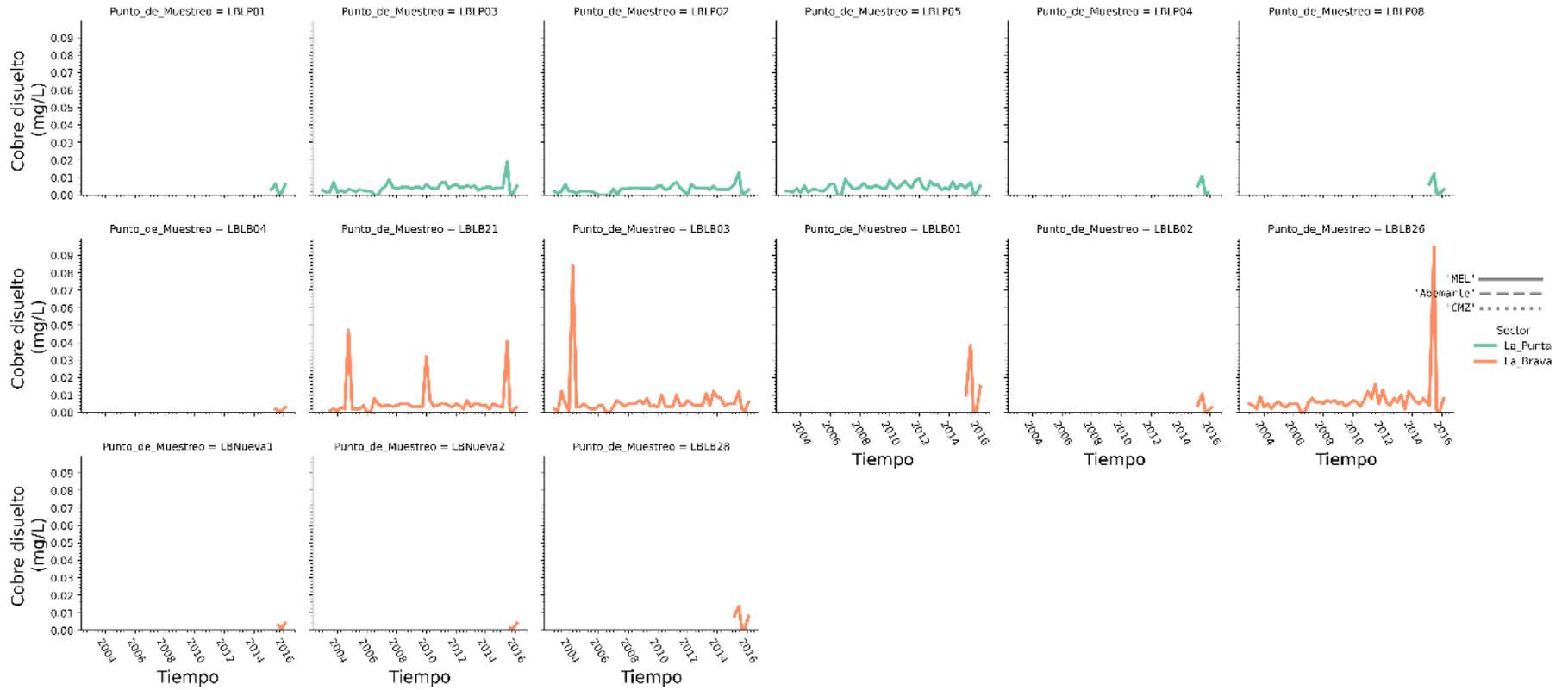


Figura 6-65 Análisis temporal de cobre disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Hierro Disuelto (mg/L)**

Los valores de hierro disuelto reportados por Minera Escondida son a partir de 1996 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones de cada año, se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-66), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una leve tendencia al aumento en La Punta, mientras que en La Brava presenta el mismo patrón a la inversa. También se observan promedios mayores en La Punta de manera continua. Se representan diferencias significativas entre ambos conjuntos con p-valor  $< 0,05$  (MWtest).

Los valores de hierro disuelto muestran una leve tendencia al aumento en La Punta y en mayor proporción en La Brava hacia el presente, además de mostrar también la variabilidad estacional ya registrada en los parámetros *in situ*. El mínimo reportado (0,000006 mg/L) en invierno 2014 y el máximo (0,0005 mg/L) en otoño 2015 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie de La Punta muestra un coeficiente de determinación considerable ( $r^2 > 0,10$ ), con una pendiente significativamente positiva para la concentración de hierro disuelto hacia el presente (pendiente = 0,0008 mg/L/año;  $r^2 = 0,3308$ ; Wtest p-valor  $< 0,05$ ). A su vez, el ajuste lineal aplicado a la serie de La Brava no presenta una correspondencia a un modelo lineal dado su bajo coeficiente de determinación ( $r^2 > 0,081$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos metales de lagunas superficiales presentaron un p-valor  $< 0,05$  en el KWtest, pero para el caso del hierro disuelto, se presenta un p-valor de 0,512 (considerando LBLP03 n=54, LBLP02 n=53, LBLP05 n=54, LBLB21 n=51, LBLB03 n=52 y LBLB26 n=53), lo que indica que los puntos de muestreo con los datos existentes no difieren significativamente entre sí.

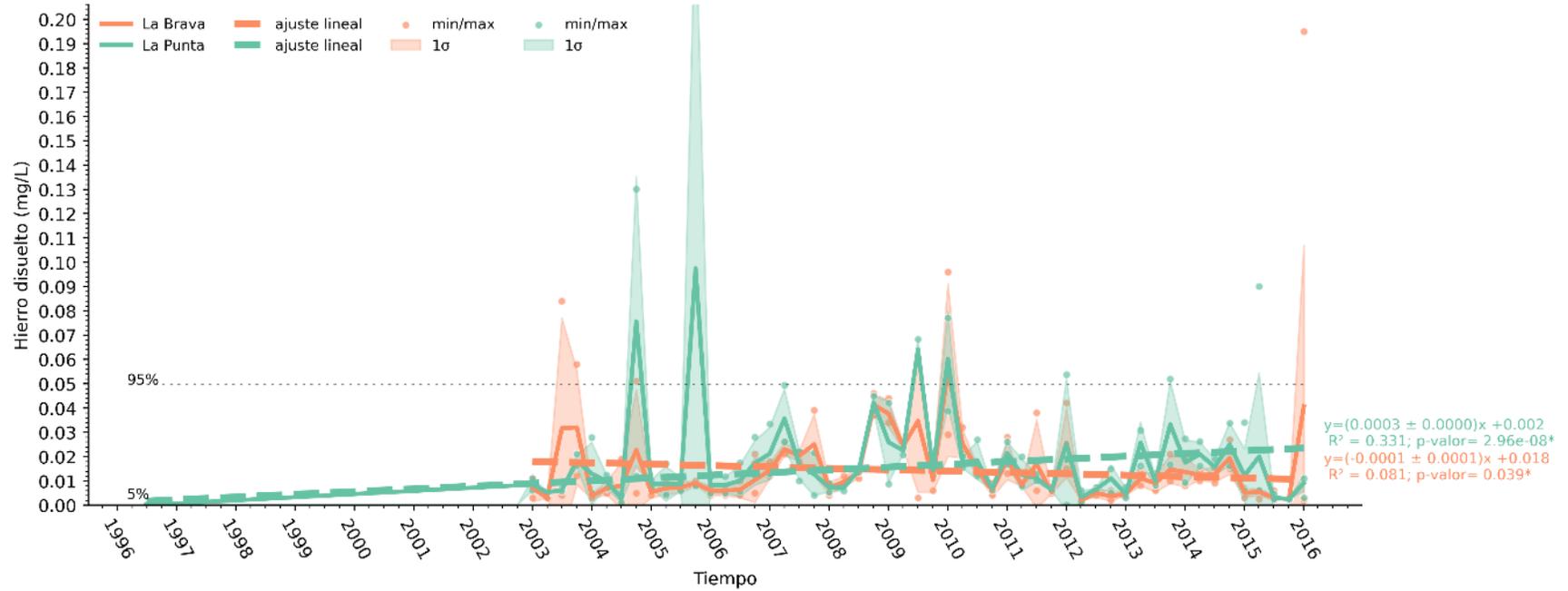


Figura 6-66 Análisis temporal y espacial de hierro disuelto de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

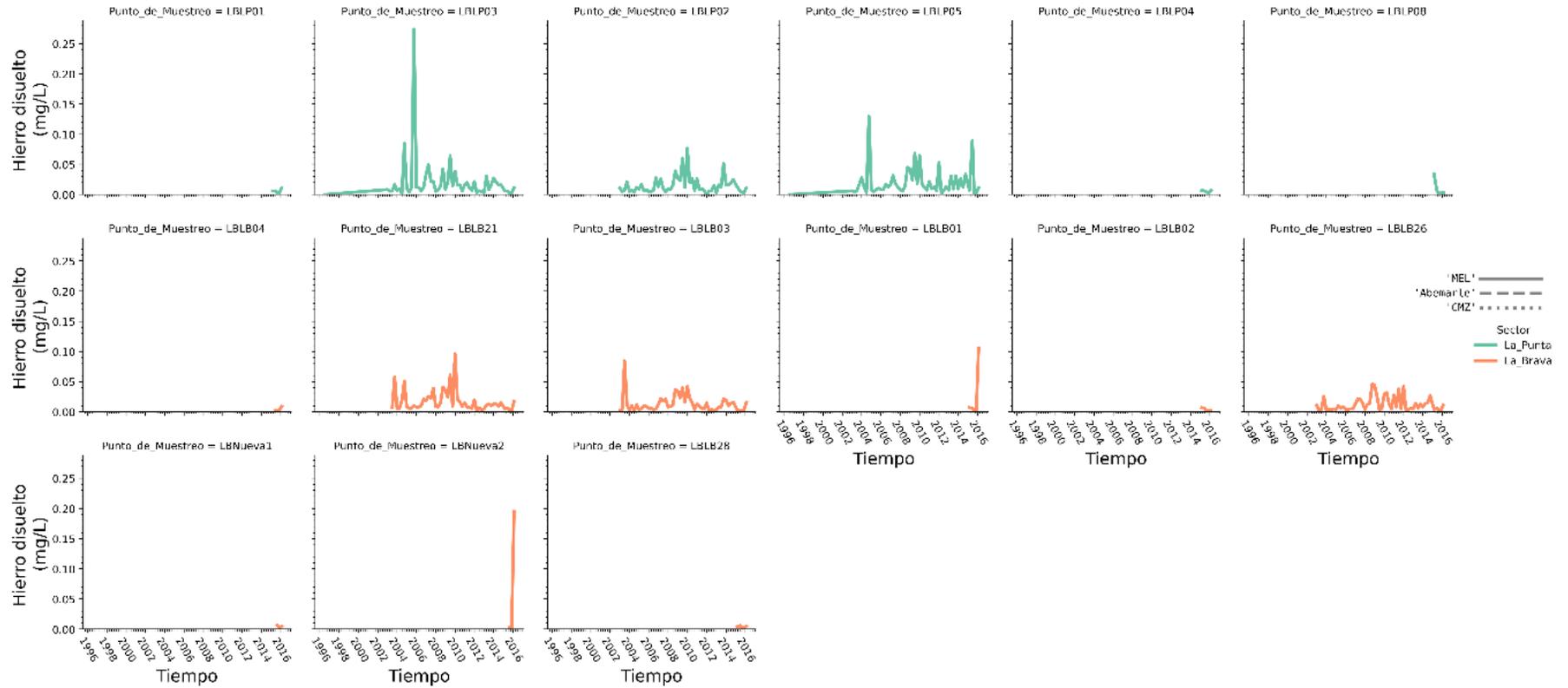


Figura 6-67 Análisis temporal de hierro disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Litio Disuelto (mg/L) (No Metálico)**

Los valores de litio disuelto reportados por Minera Escondida son a partir de 2009 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones de cada año, se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-68), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una leve tendencia a la disminución tanto en La Punta como en La Brava. También se observan promedios mayores en La Punta de manera continua. Se representan diferencias significativas entre ambos conjuntos con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest). El mínimo reportado (1,1 mg/L) en invierno 2015 en La Punta y el máximo (57,1 mg/L) en invierno 2015 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie de La Brava presenta un coeficiente de determinación sobre 0,10 para la concentración de litio disuelto, con una pendiente de -9.47 mg/L/año, aunque estadísticamente indistinguible de cero, hacia el presente, ( $r^2 = 0,1106$  y Wtest p-valor  $> 0,05$ ). A su vez, la serie de litio disuelto de La Punta no presenta una correspondencia a un modelo lineal ( $r^2 = 0,024$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos metales de lagunas superficiales presentaron un p-valor  $< 0,05$  en el KWtest, para el caso del litio disuelto, no presenta suficiente continuidad de la serie temporal, lo que indica que los puntos de muestreo con los datos existentes difieren significativamente entre sí.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-69), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo. Este análisis se realizó con los puntos de muestreo LBLP03 (n=29), LBLP02 (n=29), LBLP05 (n=28), LBLB21 (n=28) y LBLB03 (n=26), LBLB26 (n=29), ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones. El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$  utilizando los datos del período 2009-2016. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, pero no se obtuvo ningún par de estaciones con un p-valor  $< 0,05$ , por lo que no hay evidencia de qué puntos estarían difiriendo de otros. Esto puede ser producto de la baja cantidad de observaciones.

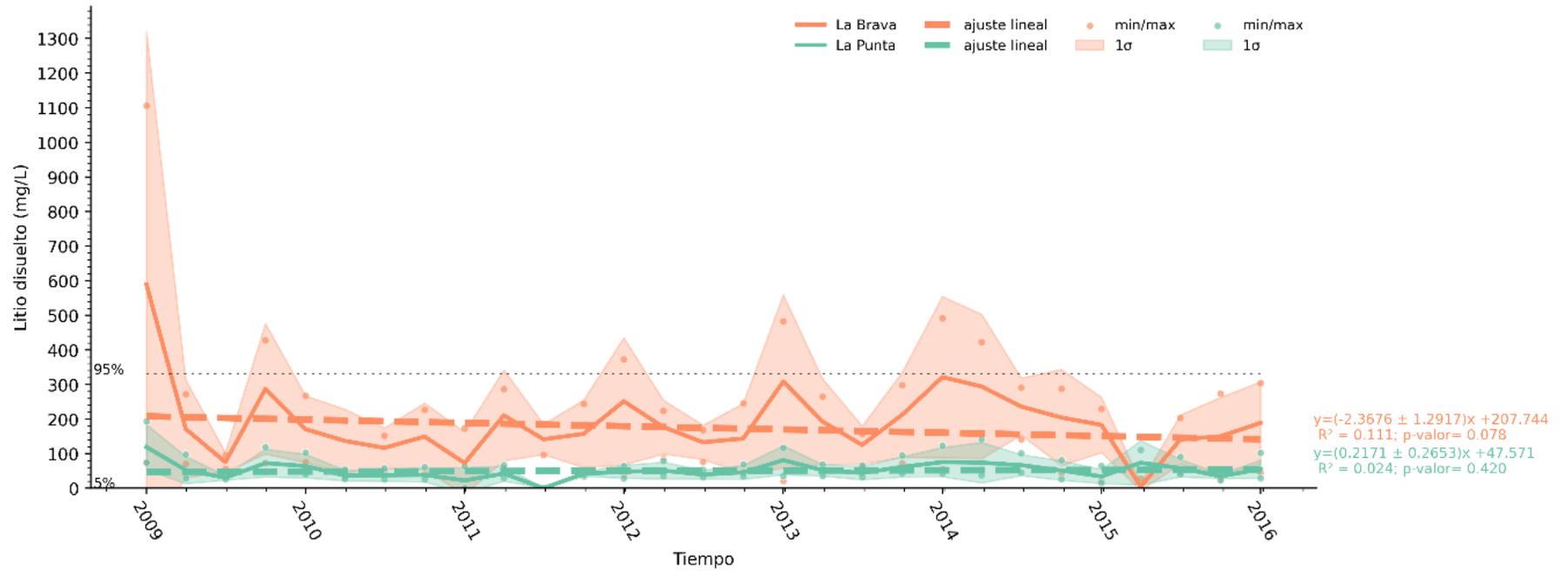


Figura 6-68 Análisis temporal y espacial de litio disuelto de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1\sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

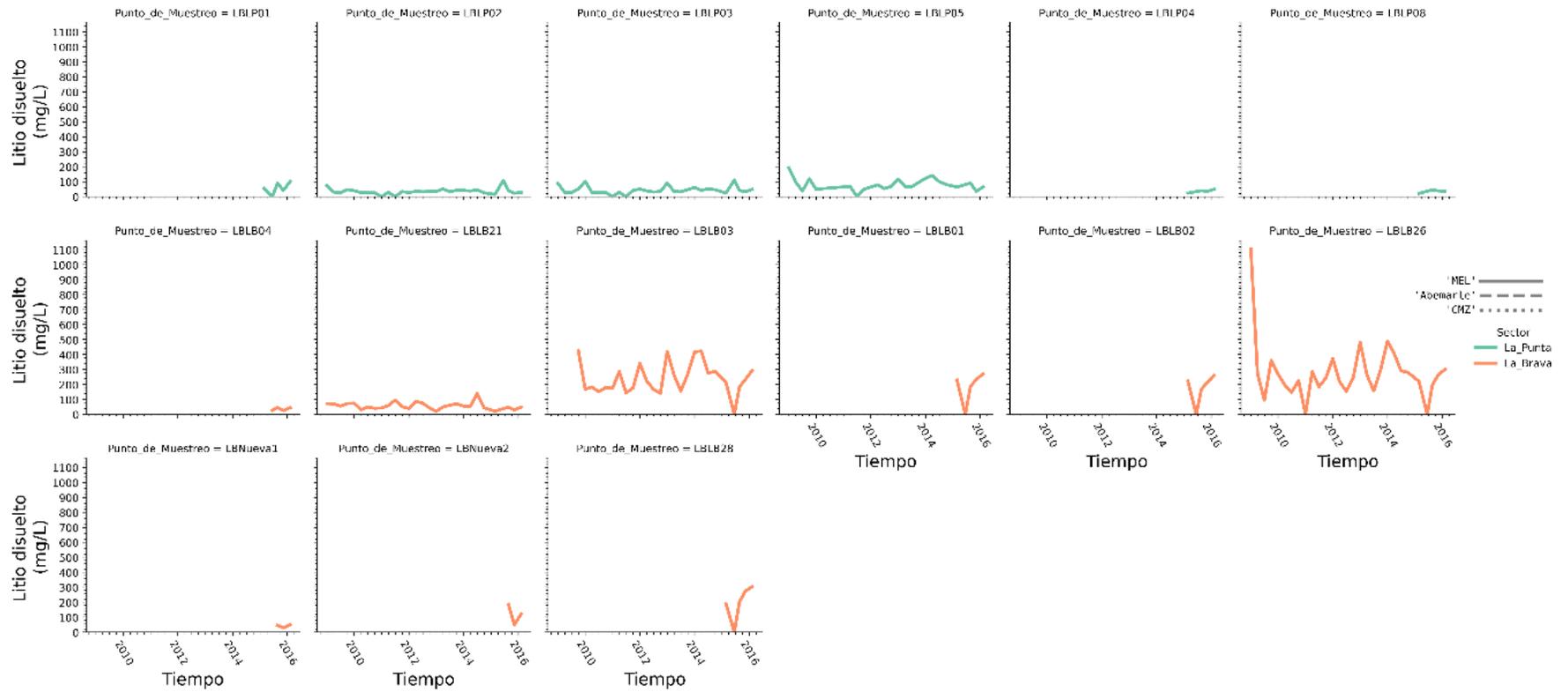


Figura 6-69 Análisis temporal de litio disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Plomo Disuelto (mg/L)**

Los valores de plomo disuelto reportados por Minera Escondida son a partir de 2003 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones de cada año, se analiza el set de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-70), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una tendencia al aumento tanto en La Punta como en La Brava. También se observan promedios mayores en La Punta de manera continua. Por su parte, no se representan diferencias significativas entre ambos conjuntos con p-valor  $> 0,05$  (MWtest).

Los valores de plomo disuelto muestran una tendencia al aumento en La Brava y en mayor proporción en La Punta hacia el presente, el mínimo reportado (0,0001 mg/L) en primavera 2018 en La Punta y el máximo anómalo (6468 mg/L) en verano 2014 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que se presentan tendencias de aumento significativo de concentraciones de plomo disuelto, y se obtiene también que el aumento observado tiene una pendiente en La Punta de 0,07408 mg/L/año ( $r^2$  de 0,6585; Wtest p-valor  $< 0,01$ ) y en La Brava una pendiente de 0,08112 mg/L/año ( $r^2=0,3424$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos metales de lagunas superficiales presentaron un p-valor  $< 0.05$  en el KWtest, pero para el caso del plomo disuelto, se presenta un p-valor  $> 0,05$  (considerando LBLP03 n=53, LBLP02 n=53, LBLP05 n=53, LBLB21 n=51, LBLB03 n=53 y LBLB26 n=53), lo que indica que los puntos de muestreo con los datos existentes no difieren significativamente entre sí.

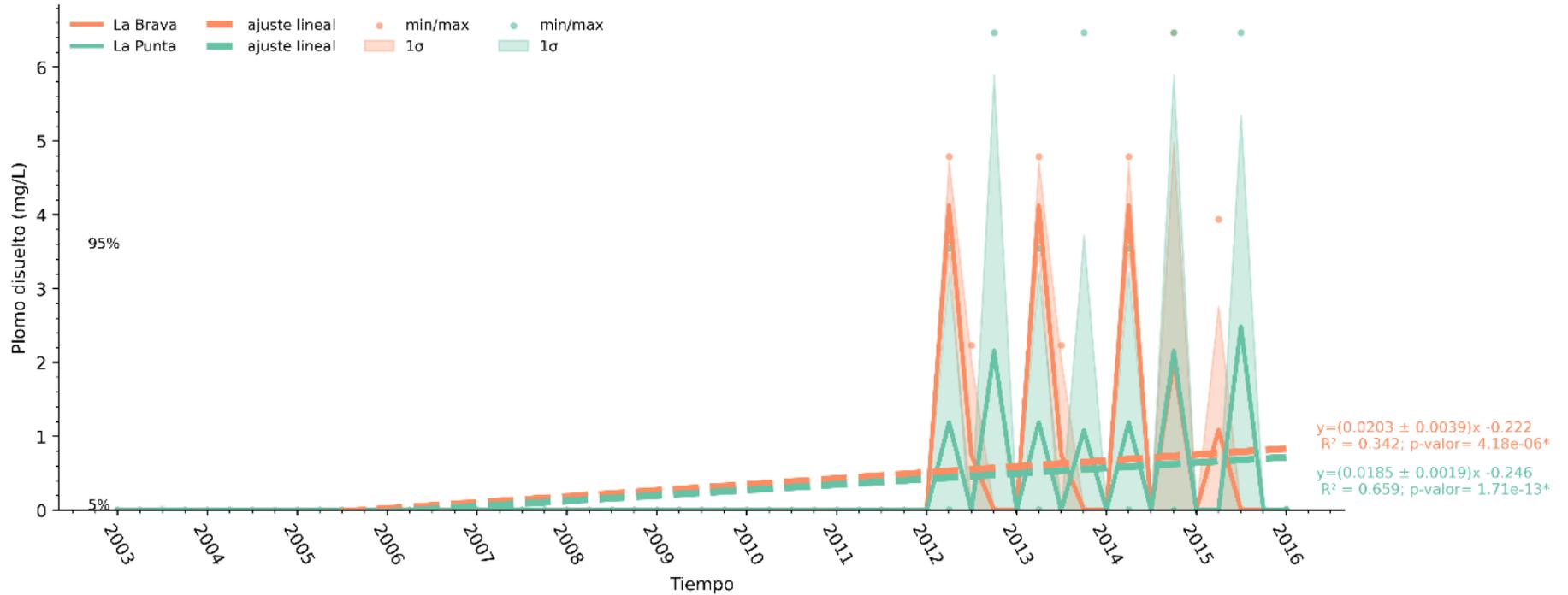


Figura 6-70 Análisis temporal y espacial de plomo disuelto de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

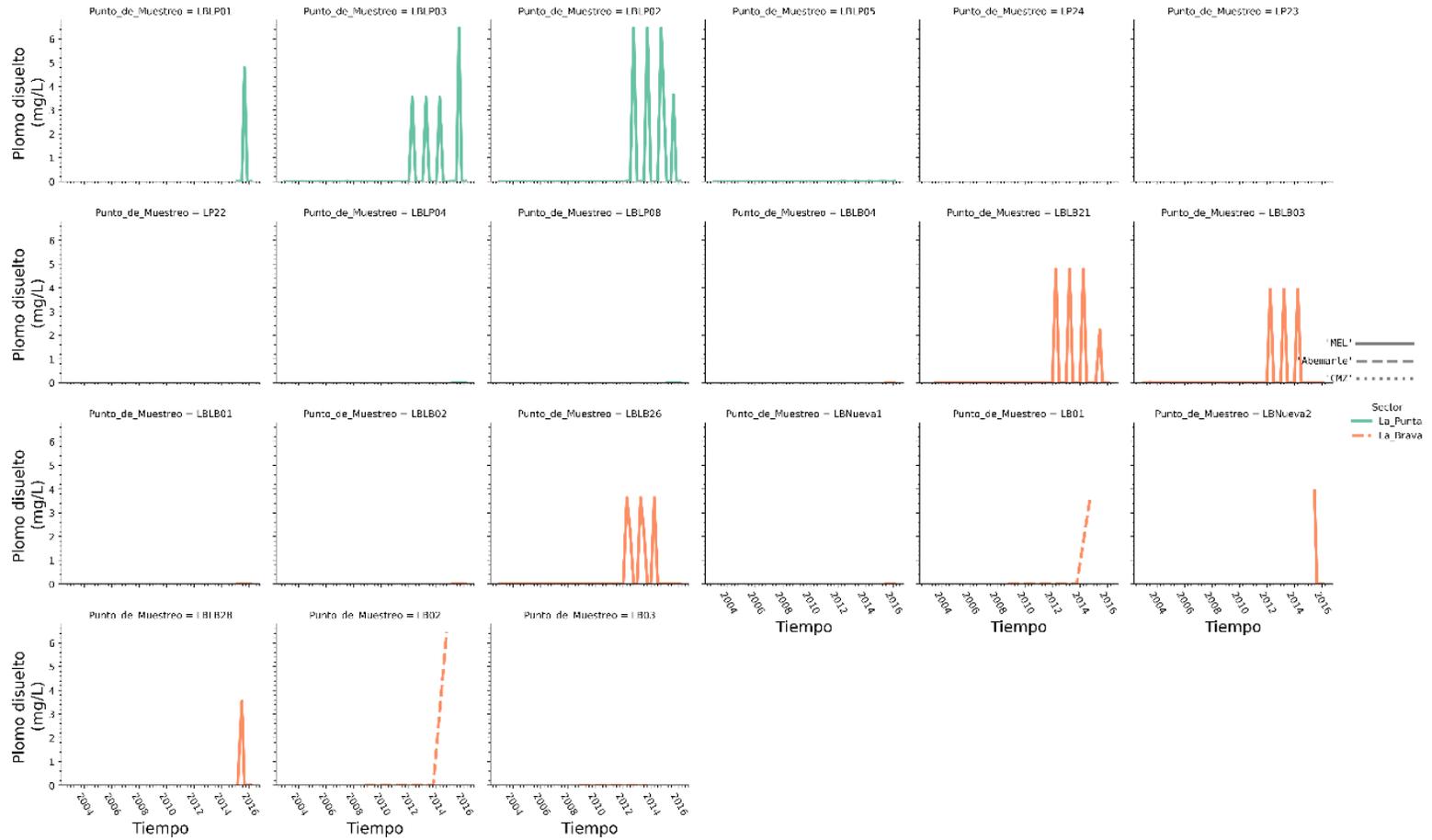


Figura 6-71 Análisis temporal de plomo disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Zinc Disuelto (mg/L)**

Los valores de zinc disuelto reportados por Minera Escondida son a partir de 2003 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones de cada año, se analiza el set de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-72), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una tendencia al aumento tanto en La Punta como en La Brava. También se observan promedios mayores en La Punta de manera continua. Por su parte, no se representan diferencias significativas entre ambos conjuntos con p-valor  $> 0,05$  (MWtest).

Los valores de zinc disuelto muestran una tendencia al aumento en La Brava y en mayor proporción en La Punta hacia el presente, el mínimo reportado (0,0007 mg/L) en invierno 2015 y el máximo anómalo (0,2302 mg/L) en otoño 2015 en La Punta.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series presentan tendencia de aumento significativo de concentraciones de plomo disuelto, donde el aumento observado tiene una pendiente en La Punta de 0,0032 mg/L/año ( $r^2=0,3658$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ) y en La Brava una pendiente de 0,0020 mg/L/año ( $r^2=0,4668$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos metales de lagunas superficiales presentaron un p-valor  $< 0.05$  en el KWtest, pero para el caso del zinc disuelto, se presenta un p-valor de 0,943025 (considerando LBLP03 n=52, LBLP02 n=52, LBLP05 n=53, LBLB21 n=50, LBLB03 n=52 y LBLB26 n=52), lo que indica que los puntos de muestreo con los datos existentes no difieren significativamente entre sí.

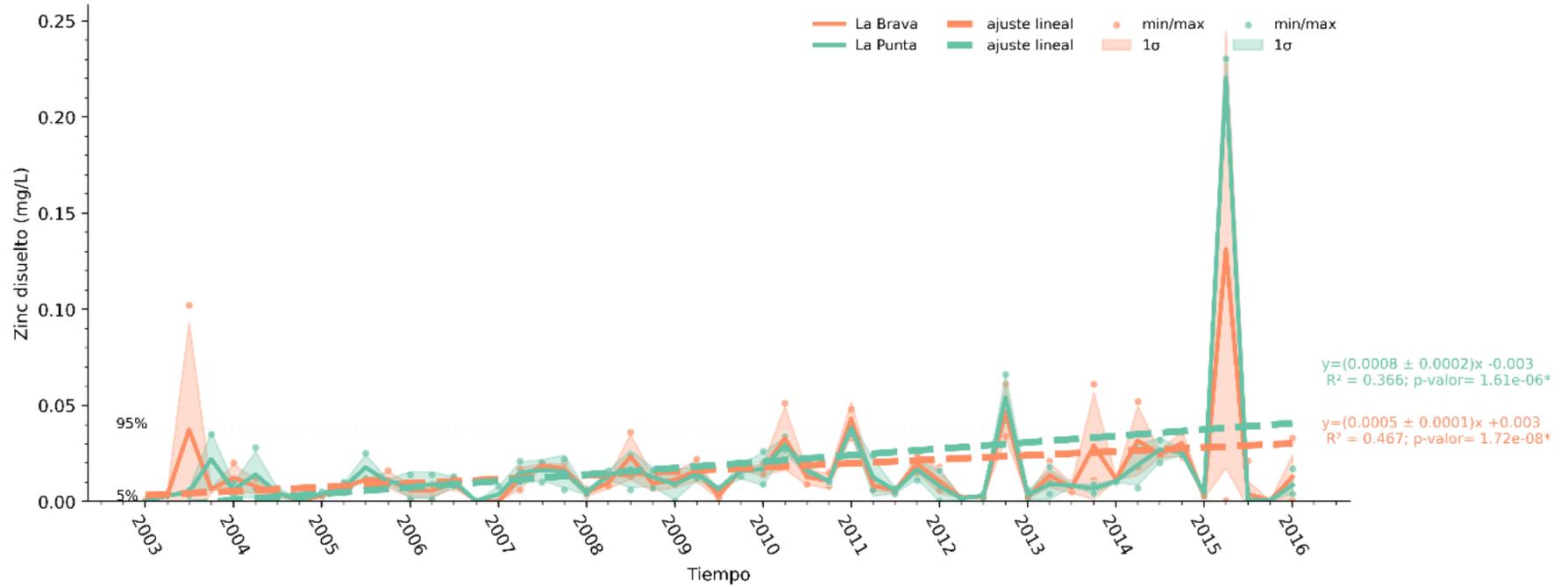


Figura 6-72 Análisis temporal y espacial de zinc disuelto de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

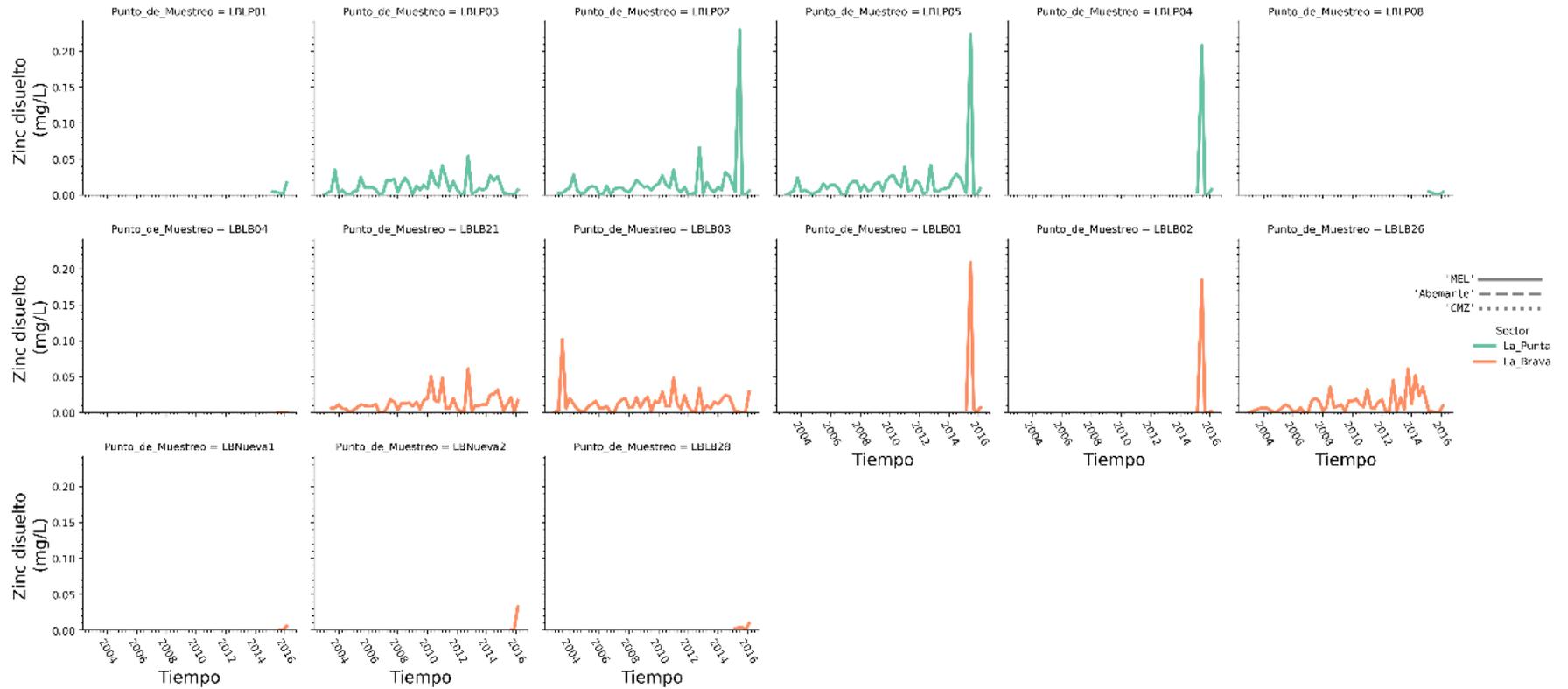


Figura 6-73 Análisis temporal de zinc disuelto por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.1.11. Nutrientes de lagunas superficiales

La determinación química de los nutrientes en lagunas superficiales es obtenida a través de la data generada por Minera Escondida a partir del año 1996 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones del año, Albemarle desde el año 2013 hasta 2019, con muestreos semestrales en invierno y verano, y Minera Zaldívar, con muestreos en 2016 y 2017. Cabe destacar que en estos últimos no hay continuidad respecto a los años.

Teniendo en cuenta la totalidad de los datos disponibles para los nutrientes de lagunas superficiales, sin diferenciar origen de los datos, se obtienen los estadígrafos de la Tabla 6-44. Se observa una gran amplitud de la distribución de los datos al no discriminar entre empresa, puntos de muestreo, lagunas ni estación del año.

Tabla 6-44 Estadígrafos de nutrientes en aguas superficiales

Parámetro	N observaciones	Promedio	SD	Mínima	Máxima	Moda	Mediana
Amonio (NH <sub>4</sub> mg/L)	534	0,120374204	0,156321105	0,000005	1,37	0,01	0,0685
Fósforo (P mg/L)	91	0,877098901	1,14332725	0,02	4,78	0,05	0,4
Nitrato (NO <sub>3</sub> mg/L)	536	0,69070482	1,218008869	0,02	8,4125	0,046	0,24
Nitrito (NO <sub>2</sub> mg/L)	376	0,009280396	0,053023157	0	0,5	0,0002	0,0011
Nitrógeno (N mg/L)	144	1,093361111	2,581859268	0,01	30,6	0,6	0,6
Ortofosfato (PO <sub>4</sub> µg/L)	538	1166,586701	1253,874968	0,005	5990	0,5	653,5
Ortofosfato (PO <sub>4</sub> mg/L)	535	0,994474383	1,32874313	0,000005	5,99	0,01	0,438

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se presentan los datos de manera espacial, por laguna (Tabla 6-45). Se observa que Laguna La Brava registra el máximo y mínimo para todos los nutrientes medidos.

Tabla 6-45 Estadígrafos por laguna de nutrientes

Parámetro	Amonio (mg/L)		Fósforo (mg/L)		Materia Orgánica (%)		Nitrógeno (mg/L)		Nitrato (mg/L)		Nitrito (mg/L)		Ortofosfato (µg/L)		Ortofosfato (mg/L)	
	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP
N observaciones	278,00	256,00	58,00	33,00	53,00	36,00	84,00	60,00	264,00	272,00	205,00	171,00	278,00	260,00	276,00	259,00
Promedio	0,17	0,07	1,09	0,51	13,09	10,15	1,24	0,89	0,85	0,53	0,01	0,00	1764,67	527,10	1,75	0,19
SD	0,19	0,08	1,34	0,50	20,47	16,58	3,32	0,73	1,44	0,93	0,07	0,02	1441,14	494,02	1,44	0,45
Mínima	0,00	0,01	0,02	0,04	1,90	2,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,50	0,00	0,01
Máxima	1,37	0,53	4,78	1,48	81,70	66,90	30,60	3,22	8,41	7,40	0,50	0,19	5990,00	5120,00	5,99	5,12
MWtest (p-valor)	7,23479E-11		0,148204153		0,091674925		0,080902221		0,023218228		0,368394876		1,26247E-12		1,39091E-23	
Dif.sig.	sí		no		no		no		sí		no		sí		Sí	

Fuente: Elaboración propia. Dif.sig: diferencia significativa; LP: La Punta; LB: La Brava

- **Amonio (mg/L)**

Para las concentraciones de amonio en lagunas superficiales, se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-74), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una tendencia a la disminución de las concentraciones de amonio hacia el presente tanto en La Punta como en el sistema lagunar La Brava. El mínimo reportado (0,00005 mg/L) en verano 2011 y el máximo (1,37 mg/L) en invierno 2017 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que tanto las series de Laguna La Punta, como La Brava muestran una leve tendencia de disminución significativa de concentración de amonio hacia el presente, con pendientes de -0,0076 mg/L/año y -0,0128 mg/L/año, con  $r^2$  de 0,5313 y 0,7568, y con p-valor < 0,001, respectivamente.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-75), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo. El KWtest (considerando LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor < 0,001, utilizando los datos del período 1996-2016.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-75), se realizó el análisis con los puntos de muestreo LBLP03NH (n=67), LBLP02 (n=70), LBLP05 (n=71), LBLB21 (n=64), LBLB03 (n=72) y LBLB26 (n=69), ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-46.

Tabla 6-46 Diferencias en puntos de muestreo de amonio

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	1,46E-08
LBLB03	LBLP02	5,47E-12
LBLB03	LBLP03	2,56E-10
LBLB03	LBLP05	2,02E-09
LBLB21	LBLB26	0,000125
LBLB26	LBLP02	5,34E-07
LBLB26	LBLP03	8,05E-06
LBLB26	LBLP05	3,97E-05

Fuente: Elaboración propia.

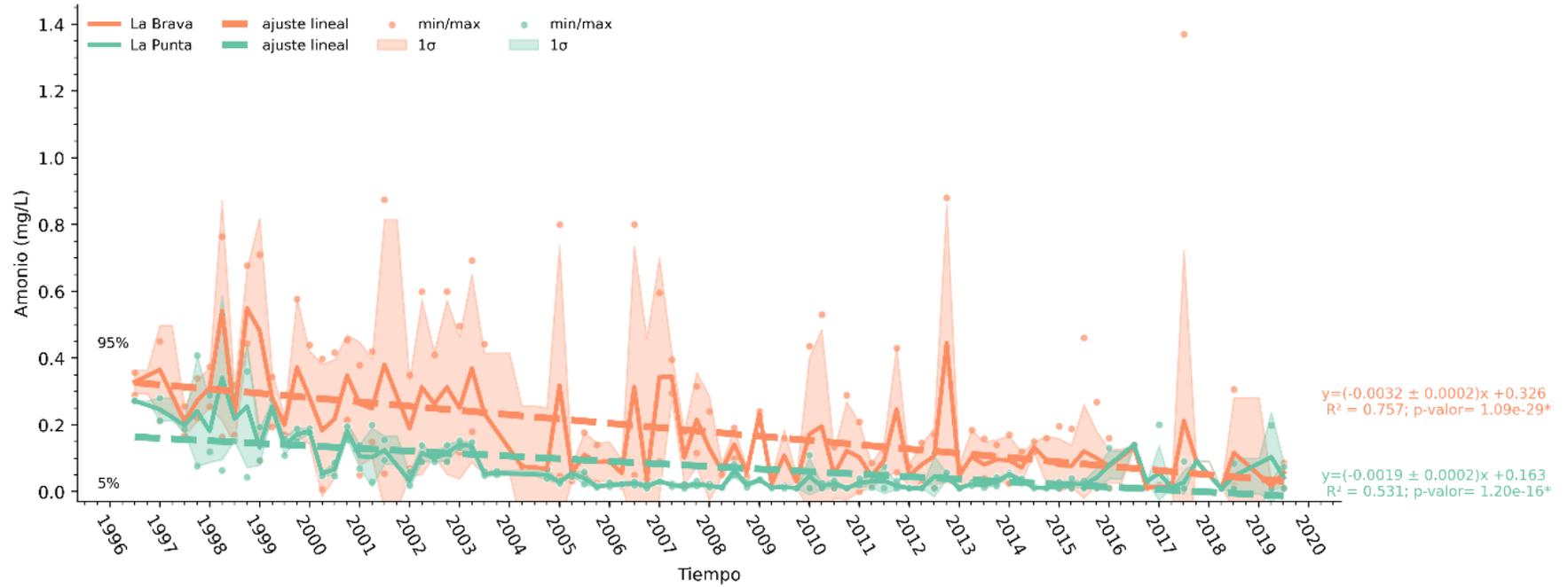


Figura 6-74 Análisis temporal y espacial de amonio de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

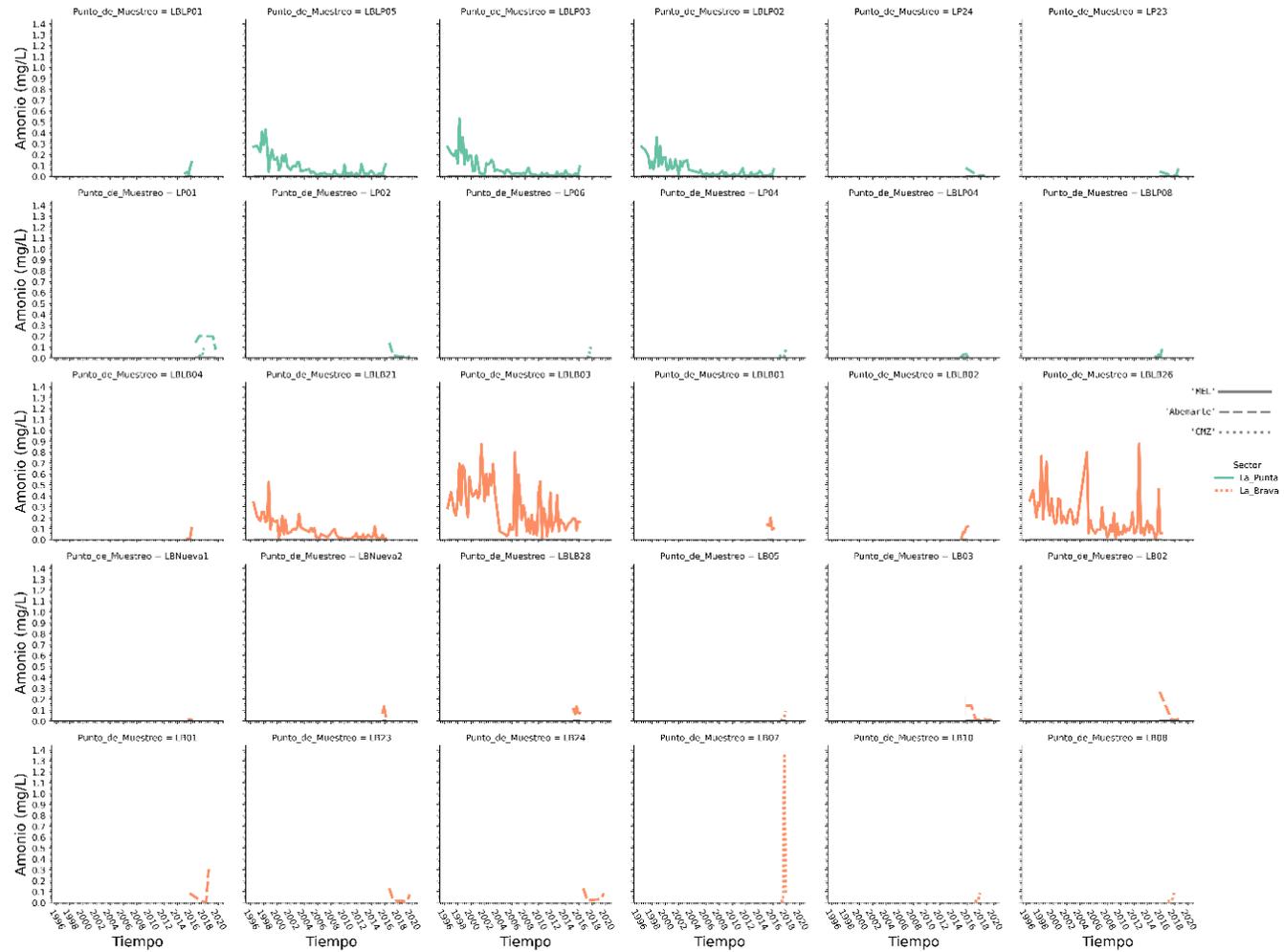


Figura 6-75 Análisis temporal de amonio por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Fósforo (mg/L)**

Los valores de fósforo reportados por Minera Escondida son a partir de 2003 hasta el 2016, Compañía Minera Zaldívar 2016 y 2017, y Albemarle en los años 2015 al 2019 con muestreos en las cuatro estaciones de cada año, se analiza el set de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-76), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una tendencia a la disminución tanto en La Punta como en La Brava. Por su parte, no se representan diferencias significativas entre ambos conjuntos con p-valor  $> 0,05$  (MWtest).

Los valores de concentraciones de fósforo muestran una tendencia a la disminución en La Punta y en mayor proporción en La Brava hacia el presente, el mínimo reportado (0,02 mg/L) en otoño 2017 y el máximo (1,08 mg/L) en invierno 2017 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series presentan tendencias de disminución significativas de concentraciones de fósforo, donde la pendiente obtenida para la serie de La Punta es de -0,3176 mg/L/año ( $r^2=0,6137$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ) y para la serie de La Brava de -0,794 mg/L/año ( $r^2=0,7113$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ).

Aumentando la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos nutrientes de lagunas superficiales presentaron un p-valor  $< 0.05$  en el KWtest, pero en el caso del fósforo, no se presenta suficiente continuidad de la serie temporal, por lo que no se puede determinar correctamente con los datos existentes si puntos de muestreo difieren significativamente entre sí.

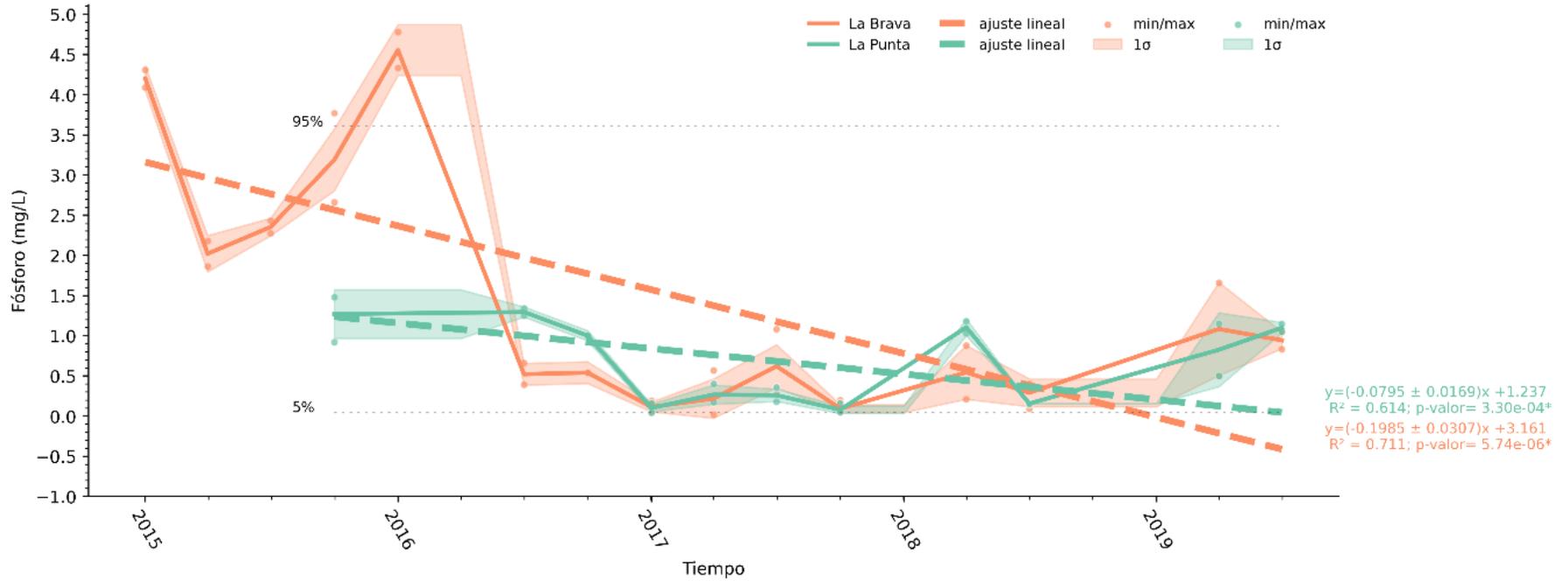


Figura 6-76 Análisis temporal y espacial de fósforo de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

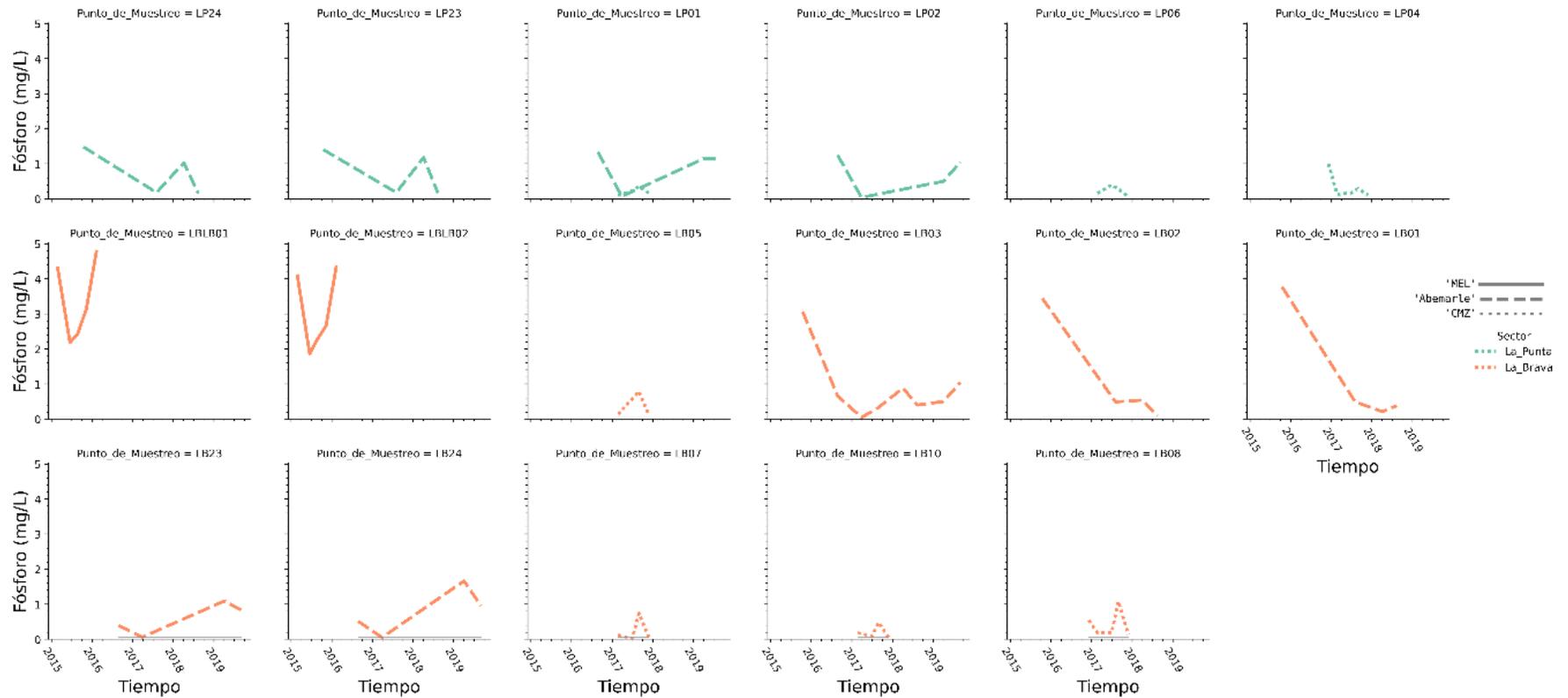


Figura 6-77 Análisis temporal de fósforo por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Materia Orgánica (%)**

Los valores de materia orgánica reportados por Minera Escondida son a partir de 2015 hasta el 2016, Compañía Minera Zaldívar 2016 y 2017, se analiza el set de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-78), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una tendencia al aumento tanto en La Punta como en La Brava, alcanzando un máximo en 2017 y cayendo abruptamente en 2018. Por su parte, no se representan diferencias significativas entre ambos conjuntos con un p-valor  $> 0,05$  (MWtest).

Los valores de concentraciones de materia orgánica porcentual muestran una tendencia al aumento en La Punta y en mayor proporción en La Brava hacia el presente, el mínimo reportado (1,9%) en invierno 2015 y el máximo (81,7%) en otoño 2017 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series presentan tendencias de aumento significativo de porcentaje de materia orgánica, donde el aumento observado tiene una pendiente en la serie de La Punta de 9,758 %/año ( $r^2=0,8898$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ) y en La Brava una pendiente de 11,148 %/año ( $r^2=0,7813$ ; Wtest p-valor=0,001), para el período de 2015 a 2018.

Aumentando la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos nutrientes de lagunas superficiales presentaron un p-valor  $< 0.05$  en el KWtest, pero en el caso de la materia orgánica, no se presenta suficiente continuidad de la serie temporal, por lo que no se puede determinar correctamente con los datos existentes si puntos de muestreo difieren significativamente entre sí.

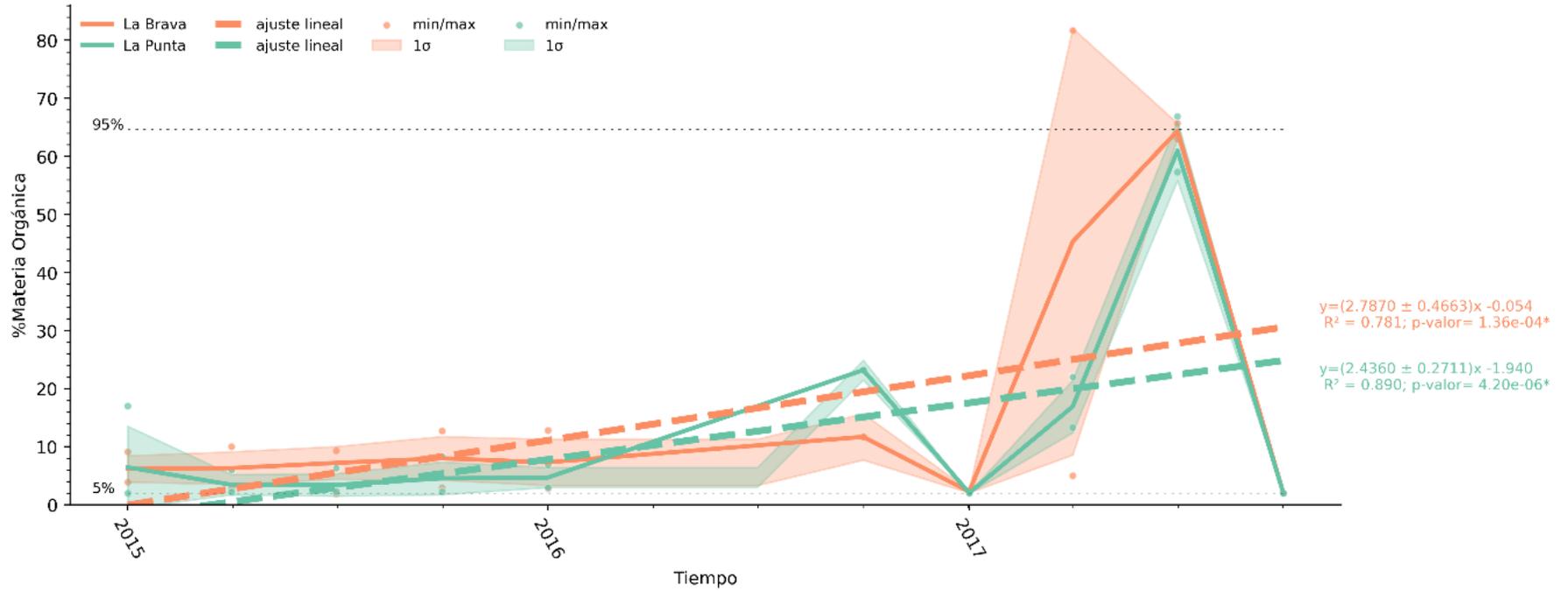


Figura 6-78 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

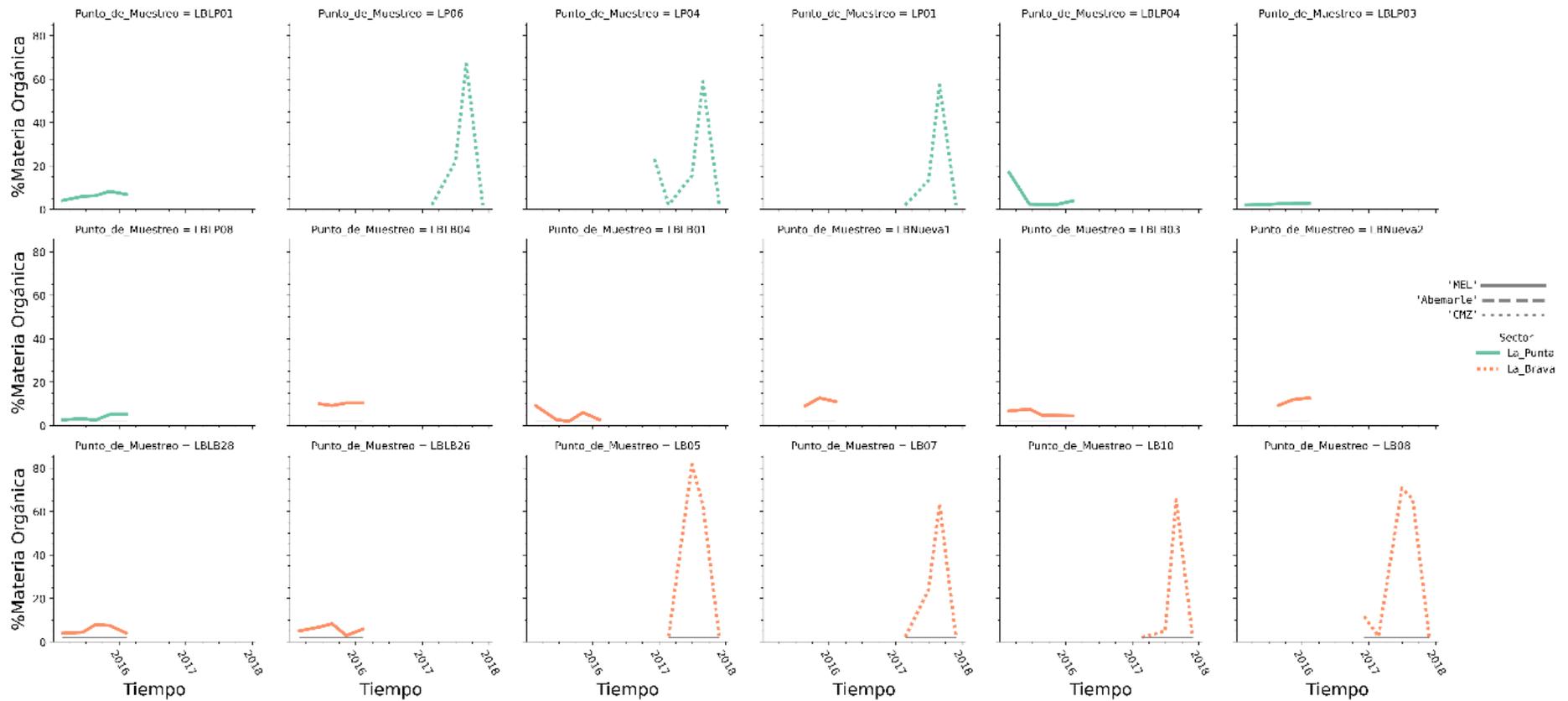


Figura 6-79 Análisis temporal de materia orgánica por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Nitrógeno (mg/L)**

Los registros de concentraciones de nitrógeno reportados por Minera Escondida son a partir de 2015 hasta el 2016, Compañía Minera Zaldivar 2016 y 2017, al igual que Albemarle se presentan datos del 2015 al 2019. Se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-80), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una tendencia a la disminución tanto en La Punta como en La Brava, alcanzando un máximo en 2017 en La Brava. Por su parte, no se representan diferencias significativas entre ambos conjuntos con p-valor  $> 0,05$  (MWtest).

Los valores de concentraciones de nitrógeno muestran una tendencia al aumento en La Punta y en mayor proporción en La Brava hacia el presente, el mínimo reportado (0,011 mg/L) en invierno 2017 y el máximo anómalo (30,6 mg/L) en primavera 2017 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series presentan tendencias de disminución de concentraciones de nitrógeno, aunque en ambos casos éstos presentan un bajo coeficiente de determinación (La Brava  $r^2=0,067$ ; La Punta  $r^2=0,123$ ), así también como p-valores inferiores a 0,05 (Wtest), por lo que no se puede afirmar alguna tendencia con respaldo estadístico.

Aumentando la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos nutrientes de lagunas superficiales presentaron un p-valor  $< 0.05$  en el KWtest, pero en el caso del nitrógeno, no se presenta suficiente continuidad de la serie temporal, por lo que no se puede determinar correctamente con los datos existentes si puntos de muestreo difieren significativamente entre sí.

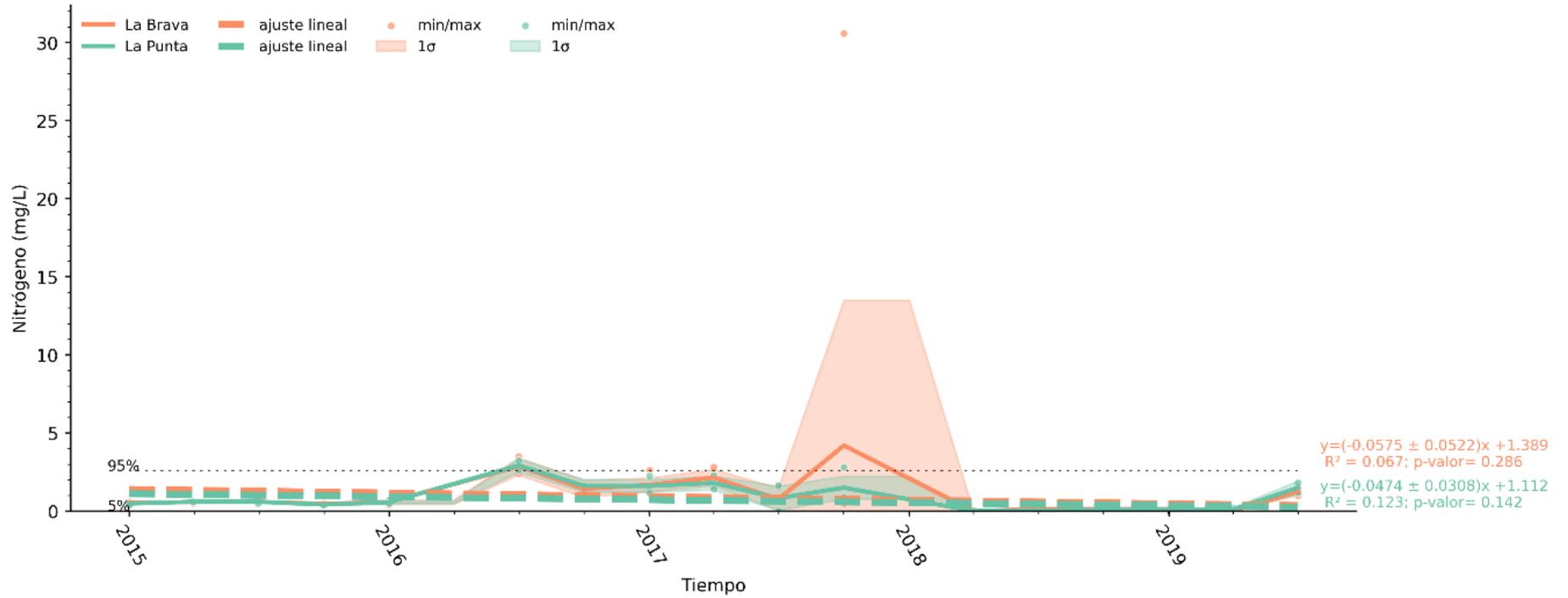


Figura 6-80 Análisis temporal y espacial de nitrógeno de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.



Figura 6-81 Análisis temporal de nitrógeno por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Nitrato (mg/L)**

Los valores de concentraciones de nitrato se analizan a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-82), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de nitrato de La Brava presenta el mismo patrón de variación hasta el año 2019, con promedios mayores que los de La Punta de manera continua, ambos conjuntos no presentan diferencias de manera significativa con  $p$ -valor  $> 0,05$  (MWtest).

Los valores de nitrato muestran una leve tendencia al aumento en La Punta y en mayor proporción en La Brava hacia el presente, además de mostrar también la variabilidad estacional ya registrada en los parámetros *in situ*. El mínimo reportado (0,02 mg/L) en verano 2003 y el máximo (8,41 mg/L) en verano 2005 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series ambas lagunas muestran una tendencia de aumento significativo de concentración de nitrato. La serie de La Punta presenta una tendencia positiva, con una pendiente de 0,0408 mg/L/año ( $r^2 = 0,1832$ ; Wtest  $p$ -valor  $< 0,001$ ) hacia el presente, mientras que la serie de La Brava con una pendiente positiva de 0,0488 mg/L/año ( $r^2 = 0,103$ ; Wtest  $p$ -valor = 0,001). El coeficiente de determinación calculado a partir del ajuste aplicado a la serie de tiempo de concentración de nitrógeno en La Brava se encuentra en el límite de lo que hemos definido como considerable, por lo que se debe tomar la afirmación de un aumento como sujeto a error.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-83), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo. Este análisis se realizó con los puntos de muestreo LBLP03 (n=75), LBLP02 (n=74), LBLP05 (n=75), LBLB21 (n=56) y LBLB03 (n=67), LBLB26 (n=64), ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones. El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un  $p$ -valor  $< 0,05$  utilizando los datos del período 1997-2019. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, pero no se obtuvo ningún par de estaciones con un  $p$ -valor  $> 0,05$ , por lo que no hay evidencia de qué puntos estarían difiriendo de otros.

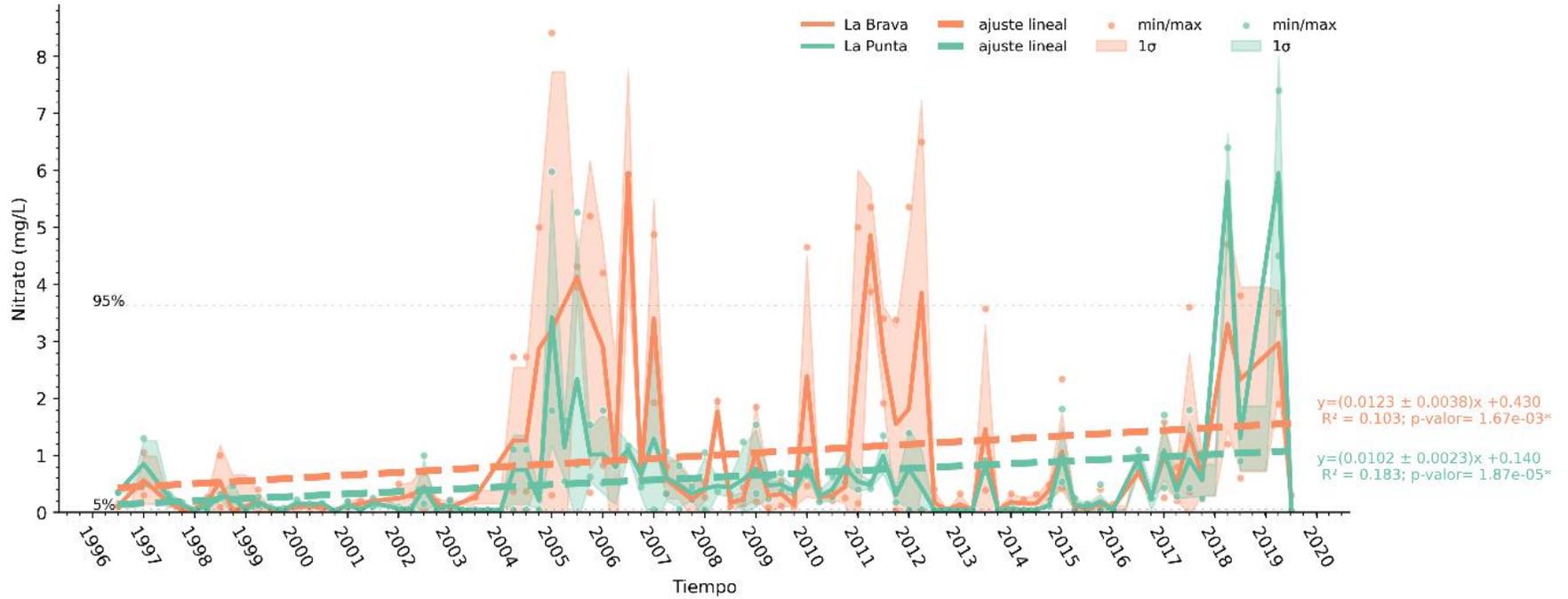


Figura 6-82 Análisis temporal y espacial de nitrato de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

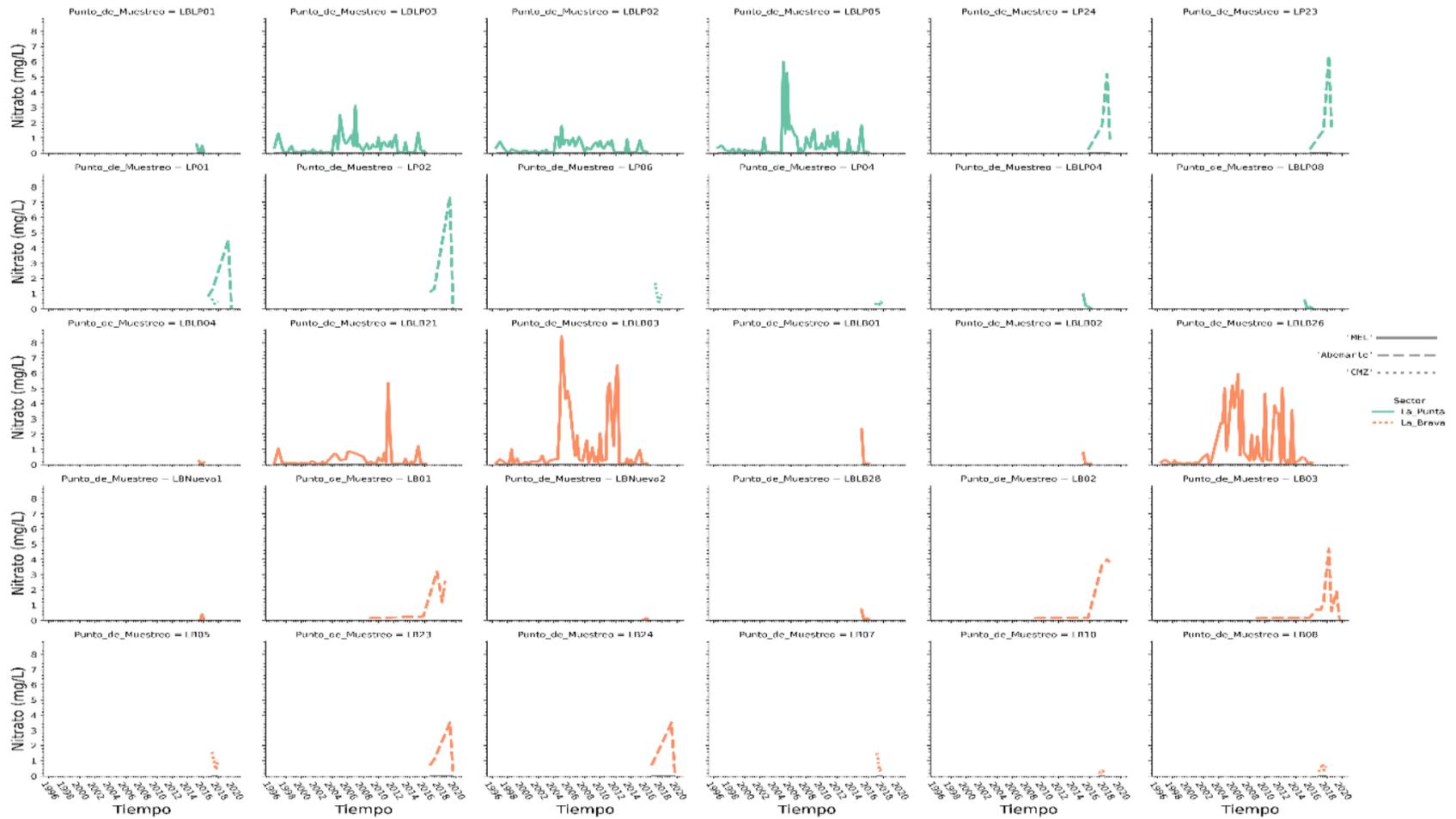


Figura 6-83 Análisis temporal de nitrato por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Nitrito (mg/L)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-84), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de concentraciones de nitrito presenta una leve tendencia a la baja para ambas lagunas. Además, La Brava muestra un máximo de concentración de nitrito en 2008, en tanto La Punta se observa el registro más alto en 1997, pero menos pronunciada. Ambos conjuntos difieren significativamente con un p-valor  $< 0,05$  (MWtest).

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que el coeficiente de determinación para las series de ambas lagunas es  $< 0,10$ , por lo que no hay correspondencia a un modelo lineal, y más, no se puede afirmar alguna tendencia con respaldo estadístico.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos nutrientes de lagunas superficiales presentaron un p-valor  $< 0.05$  en el KWtest, pero para el caso de la concentración de nitrito, se presenta un p-valor  $> 0,05$  (considerando LBLP03 n=42, LBLP02 n=40, LBLP05 n=41, LBLB21 n=43, LBLB03 n=44 y LBLB26 n=41), lo que indica que los puntos de muestreo con los datos existentes no difieren significativamente entre sí.

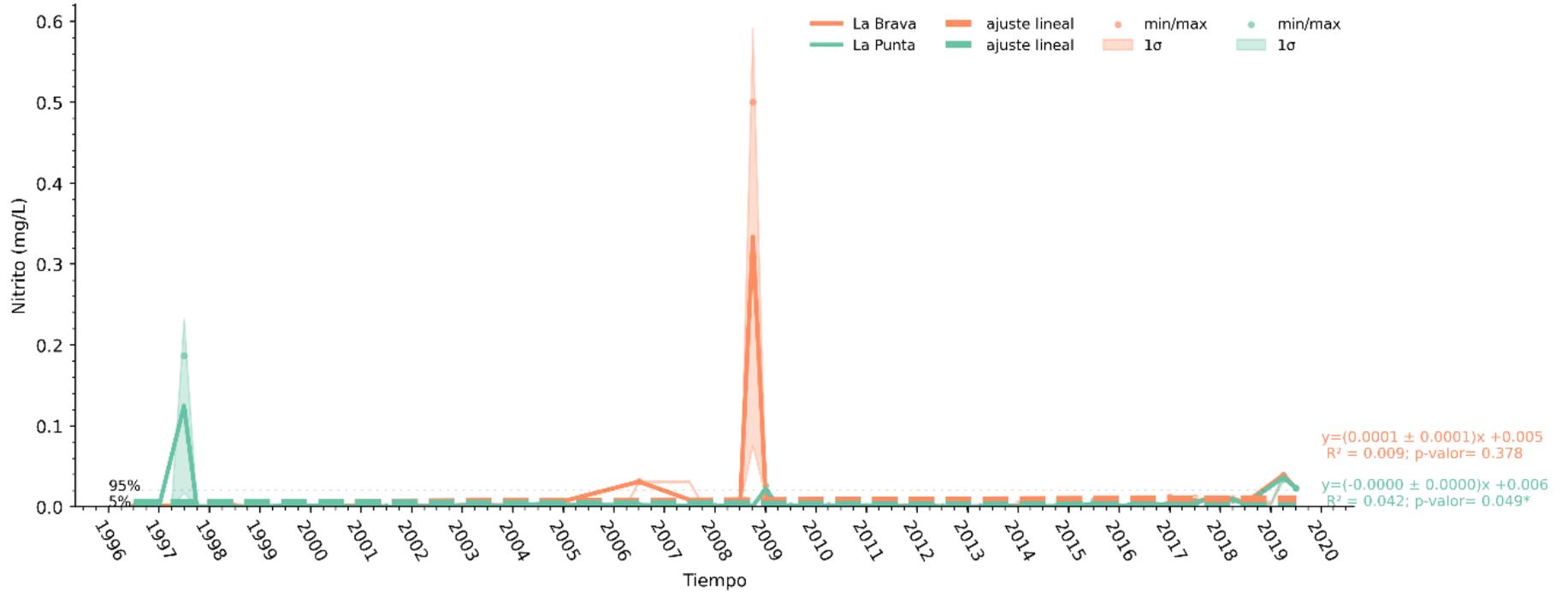


Figura 6-84 Análisis temporal y espacial de nitrito de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

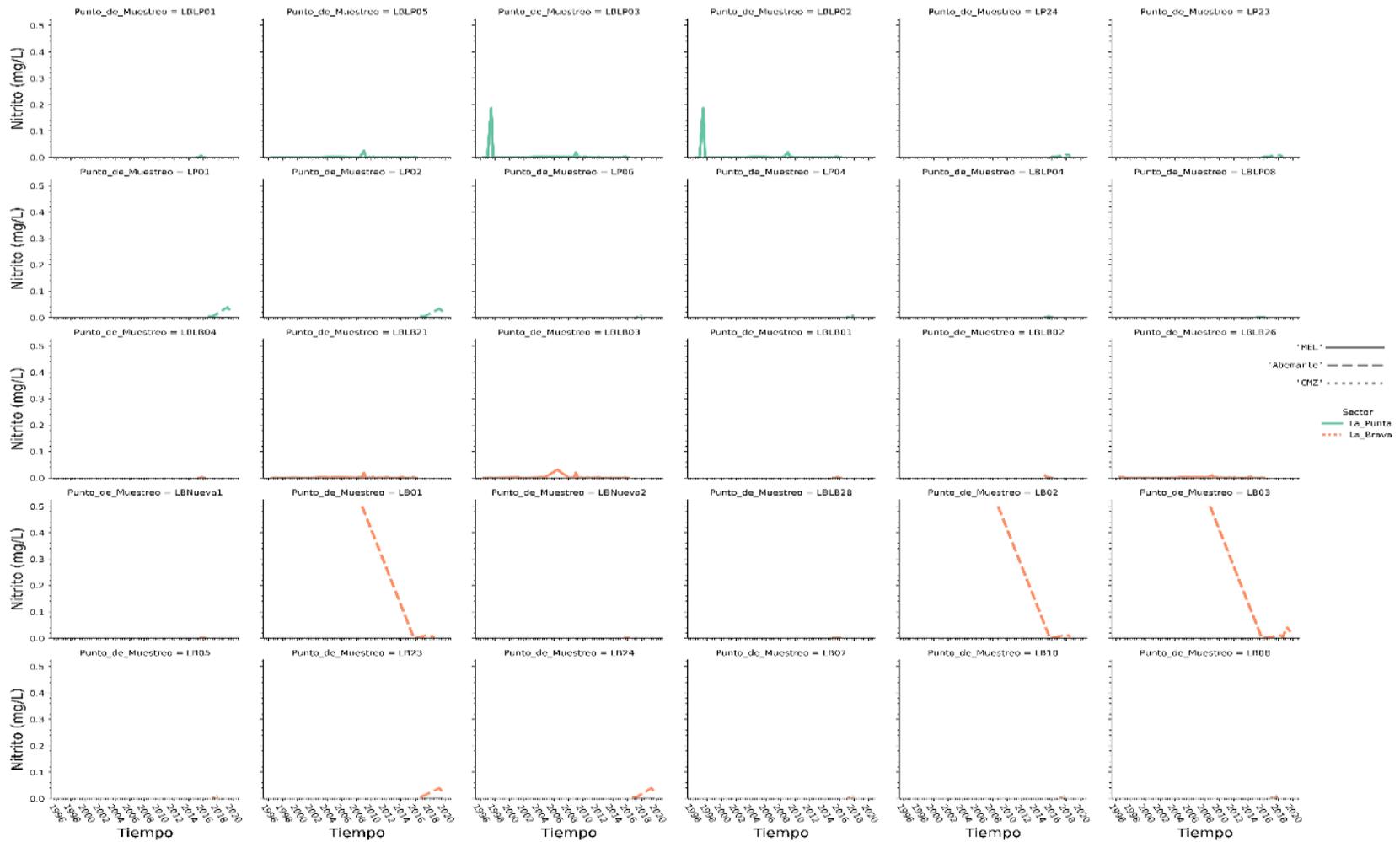


Figura 6-85 Análisis temporal de nitrito por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Ortofosfato ( $\mu\text{g/L}$ )**

Analizando el set de datos a una resolución temporal estacional para ambas lagunas (Figura 6-86), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de concentración de ortofosfato ( $\mu\text{g/L}$ ), presenta tendencia a la baja para ambas lagunas, en tanto La Brava muestra la tendencia a la disminución de manera más progresiva. Los conjuntos de ambas lagunas difieren significativamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest). El menor registro de concentraciones de ortofosfato se encuentra en primavera 2003 ( $0,0005 \mu\text{g/L}$ ) y el mayor registro anómalo se encuentra en verano 2007 ( $5990 \mu\text{g/L}$ ) en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series presentan tendencias de disminución significativas de concentraciones de ortofosfato ( $\mu\text{g/L}$ ), donde la pendiente para el ajuste de la serie de La Punta es  $-11,808 \mu\text{g/L/año}$  ( $r^2=0,2000$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ) y en La Brava de  $-59,49 \mu\text{g/L/año}$  ( $r^2=0,3934$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-87), se realizó el análisis con los puntos de muestreo LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26 (todos con  $n=76$ ), ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones. El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando los datos del período 1996-2019. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-47.

Tabla 6-47 Diferencias en puntos de muestreo de ortofosfato.

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	1,67E-07
LBLB03	LBLP02	6,65E-28
LBLB03	LBLP03	4,29E-19
LBLB03	LBLP05	2,14E-06
LBLB21	LBLB26	8,91E-10
LBLB21	LBLP03	0,001292
LBLB26	LBLP02	1,99E-32
LBLB26	LBLP03	7,57E-23
LBLB26	LBLP05	1,95E-08
LBLP02	LBLP05	1,09E-08
LBLP03	LBLP05	0,000198

Fuente: Elaboración propia.

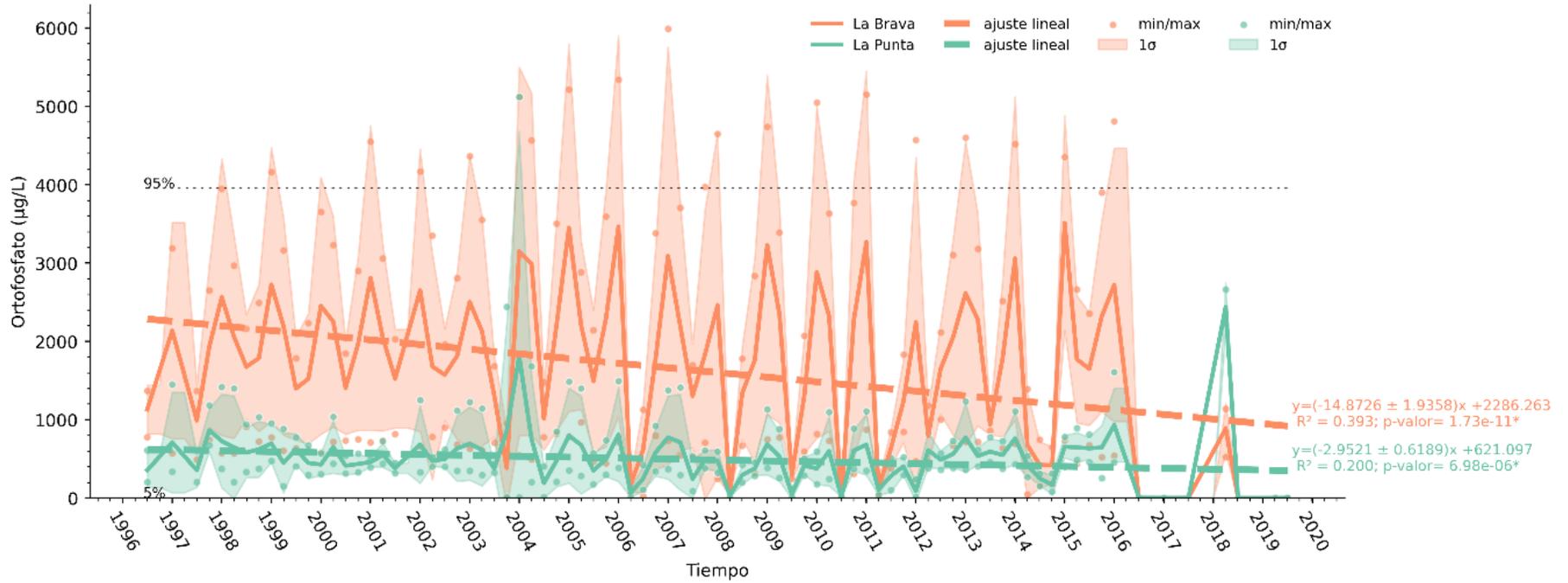


Figura 6-86 Análisis temporal y espacial de ortofosfato de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

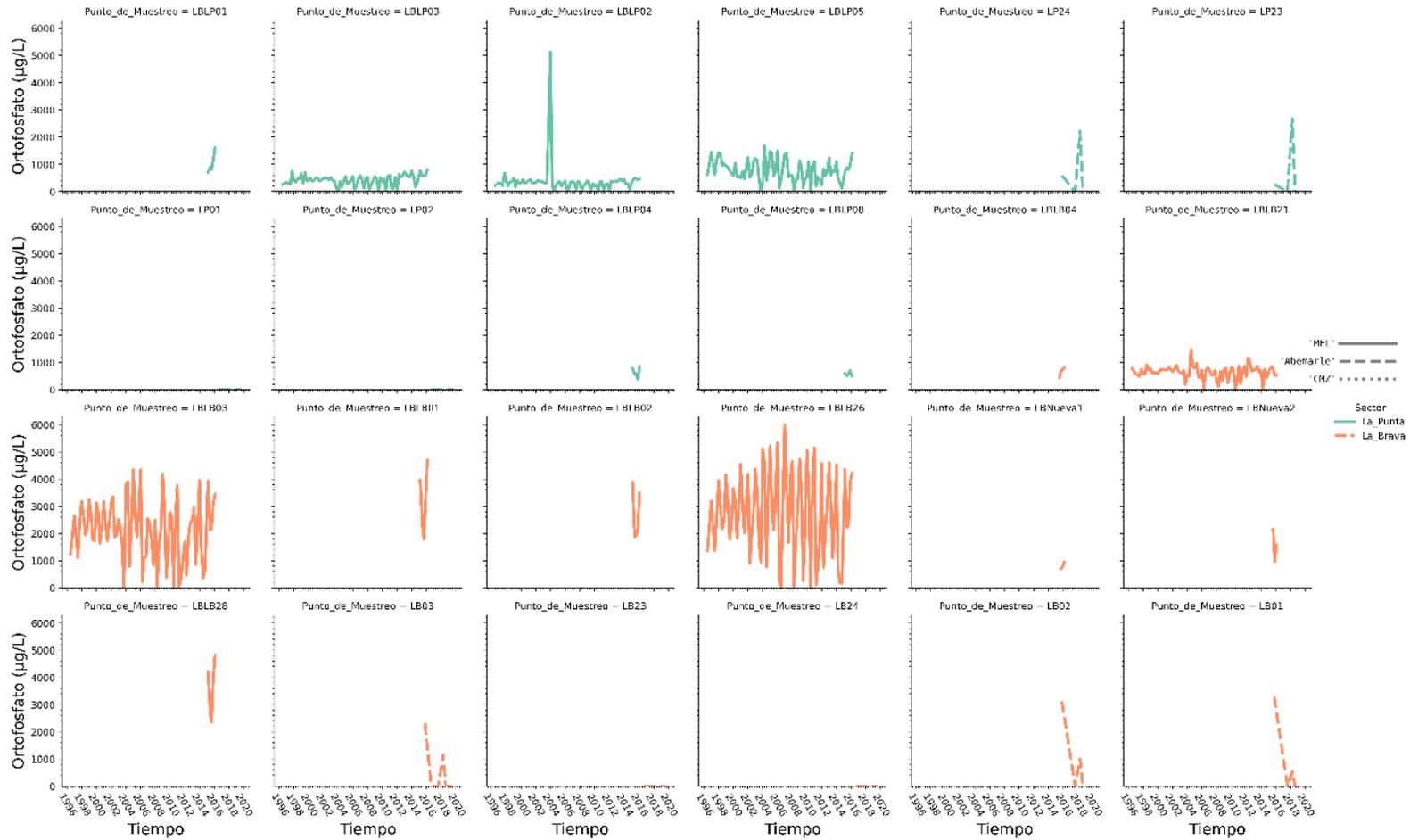


Figura 6-87 Análisis temporal de ortofosfato por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Ortofosfato (mg/L)**

Los valores de concentraciones de ortofosfato (mg/L) reportados por Minera Escondida son a partir de 2010 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones de cada año y por Compañía Minera Zaldívar desde el 2016 hasta el 2017. Se analiza el set de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-88), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de ortofosfato de La Brava presenta el mismo patrón de tendencia a la baja, con promedios mayores que los de La Punta de manera continua, difiriendo ambas curvas de manera significativa con p-valor  $< 0,001$  (MWtest). El mínimo reportado (0,000005 mg/L) en primavera 2003 y el máximo (5,99 mg/L) en verano 2007 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series ambas lagunas muestran una tendencia significativa de concentraciones de ortofosfato (mg/L), la serie de La Punta presenta una tendencia aumento significativo, con una pendiente de 0,010 mg/L/año ( $r^2=0,1706$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ) hacia el presente, mientras que la serie de La Brava con una pendiente negativa de -0,0348 mg/L/año ( $r^2=0,1611$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ).

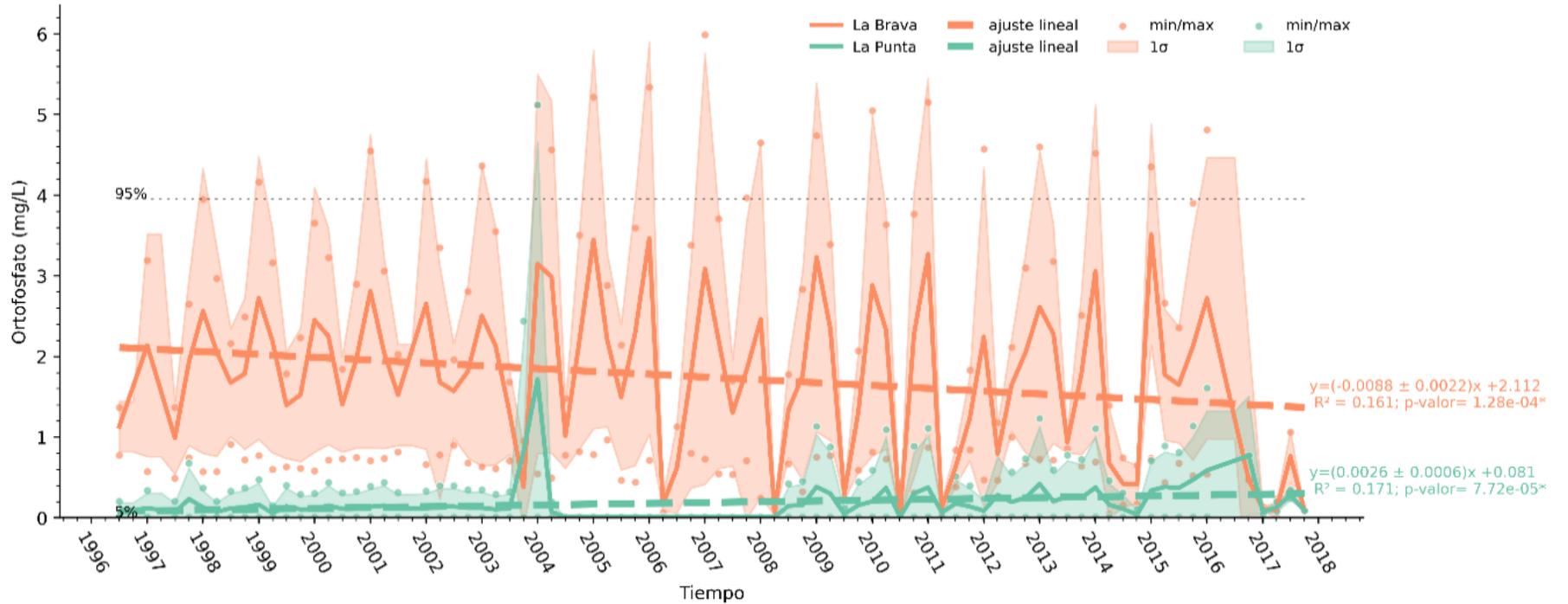


Figura 6-88 Análisis temporal y espacial de salinidad de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

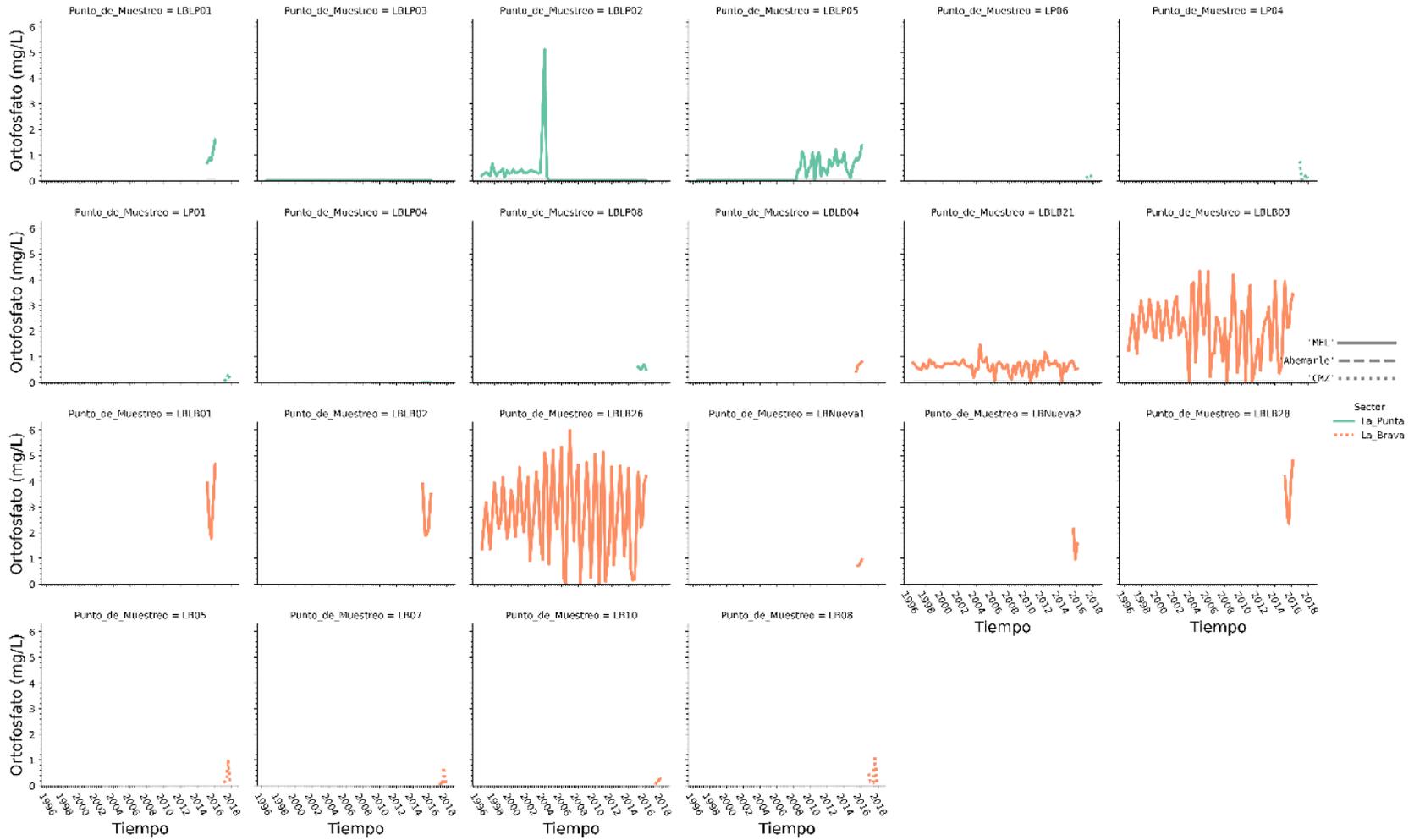


Figura 6-89 Análisis temporal de ortofosfato por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.1.12. Otros parámetros de aguas superficiales

- **Clorofila a (mg/L)**

Los valores de concentraciones de clorofila *a* se analizan a una resolución temporal estacional para ambas lagunas (Figura 6-90), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de clorofila '*a*' presenta una distribución atípica entre los resultados encontrados, con promedios mayores en el sistema lagunar La Punta en el año 2015 y en el año 2018 a 2019 con promedios mayores en La Brava, ambos conjuntos no presentan diferencias de manera significativa con *p*-valor  $> 0,05$  (MWtest). El mínimo reportado (0,003 mg/L) en verano 2015 en La Brava y el máximo (31,9 mg/L) en otoño 2014 en La Punta.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que la serie de La Brava presenta una tendencia de aumento significativo, con una pendiente de 1.61 mg/L/año ( $r^2=0,8809$  Wtest *p*-valor  $< 0,001$ ) hacia el presente, mientras que la serie de La Punta presenta un coeficiente de determinación menor a 0,10, por lo que no se puede estimar una tendencia de aumento o disminución lineal ( $r^2=0,0250$ ; Wtest *p*-valor  $> 0,05$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos parámetros de aguas superficiales presentaron un *p*-valor  $< 0.05$  en el KWtest, excepto clorofila *a* no había suficiente continuidad de la serie temporal, por lo que se puede determinar correctamente qué puntos difieren significativamente de otros.

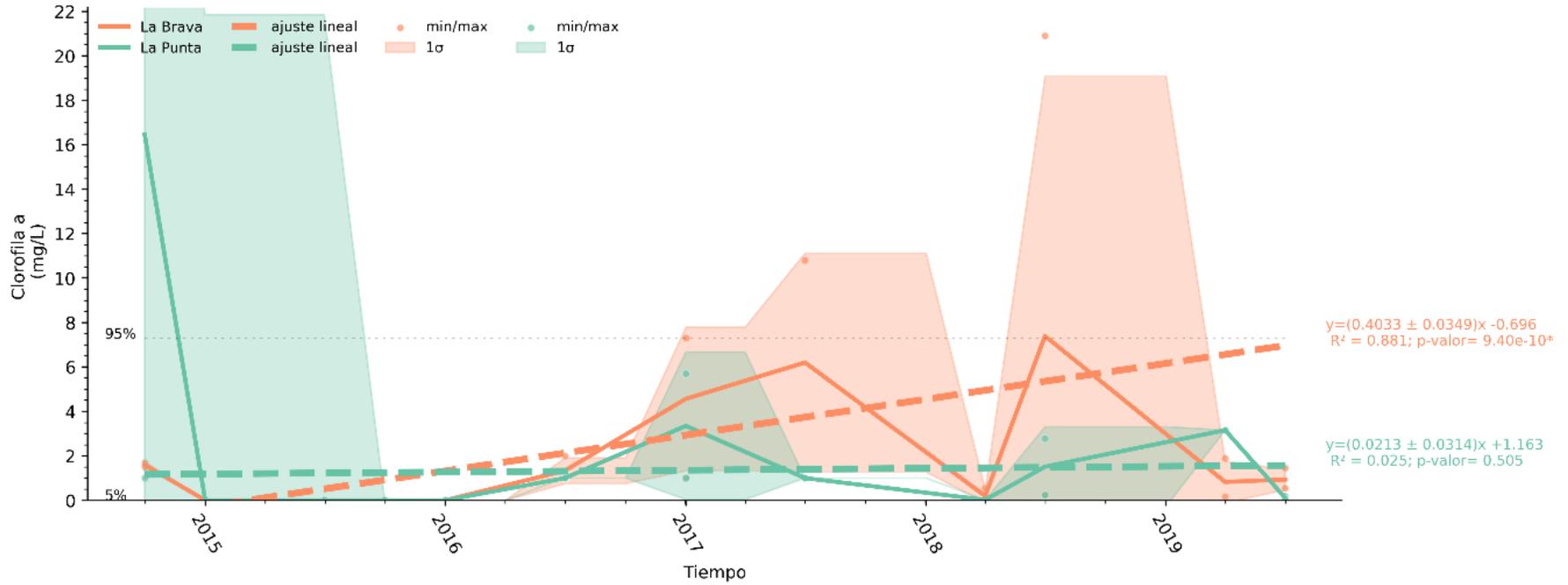


Figura 6-90 Análisis temporal y espacial de clorofila 'a' de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

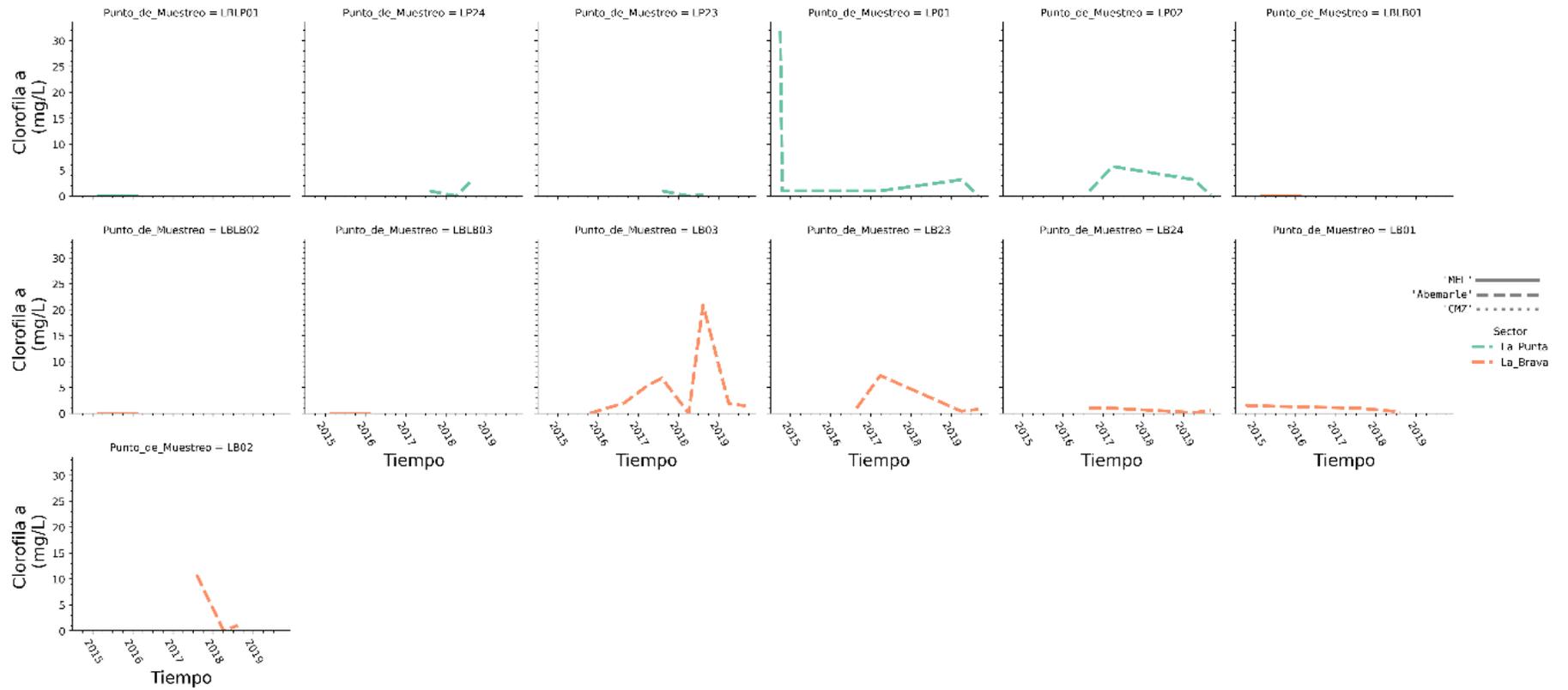


Figura 6-91 Análisis temporal de clorofila 'a' por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Alcalinidad (CaCO<sub>3</sub> mg/L)**

Los valores de alcalinidad reportados por Minera Escondida son a partir de 1996 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones de cada año, y Albemarle desde el año 2013 hasta 2019, con muestreos semestrales en invierno y verano. Se analiza el set de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-91), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una leve tendencia al aumento tanto en La Punta como en La Brava. También se observan promedios mayores en La Brava de manera continua. Se representan diferencias significativas entre ambos conjuntos con p-valor < 0,001 (MWtest).

El mínimo reportado (223 CaCO<sub>3</sub> mg/L) en otoño 2009 en La Punta y el máximo (2400 CaCO<sub>3</sub> mg/L) en verano 2013 en La Brava. Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie de La Punta muestra una tendencia de aumento significativo de alcalinidad, con una pendiente de 0,7880 mg/L/año hacia el presente, ( $r^2= 0,3816$ ; Wtest p-valor < 0,001). A su vez, La Brava presenta un coeficiente de determinación inferior a 0,10 por lo que se puede determinar una tendencia ( $r^2= 0,034$ ; Wtest p-valor > 0,05).

El KWtest (considerando LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26; todo con n=76) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor < 0,001. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-48.

Tabla 6-48 Diferencias en puntos de muestreo de Alcalinidad

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB21	4,26E-32	LBLB21
LBLP02	1,27E-20	LBLP02
LBLP03	4,51E-25	LBLP03
LBLP05	5E-05	LBLP05
LBLB26	1,07E-31	LBLB26
LBLP05	3,57E-13	LBLP05
LBLP02	2,54E-20	LBLP02
LBLP03	9,94E-25	LBLP03
LBLP05	6,08E-05	LBLP05
LBLP05	2,31E-06	LBLP05
LBLP05	7,07E-09	LBLP05

Fuente: Elaboración propia.

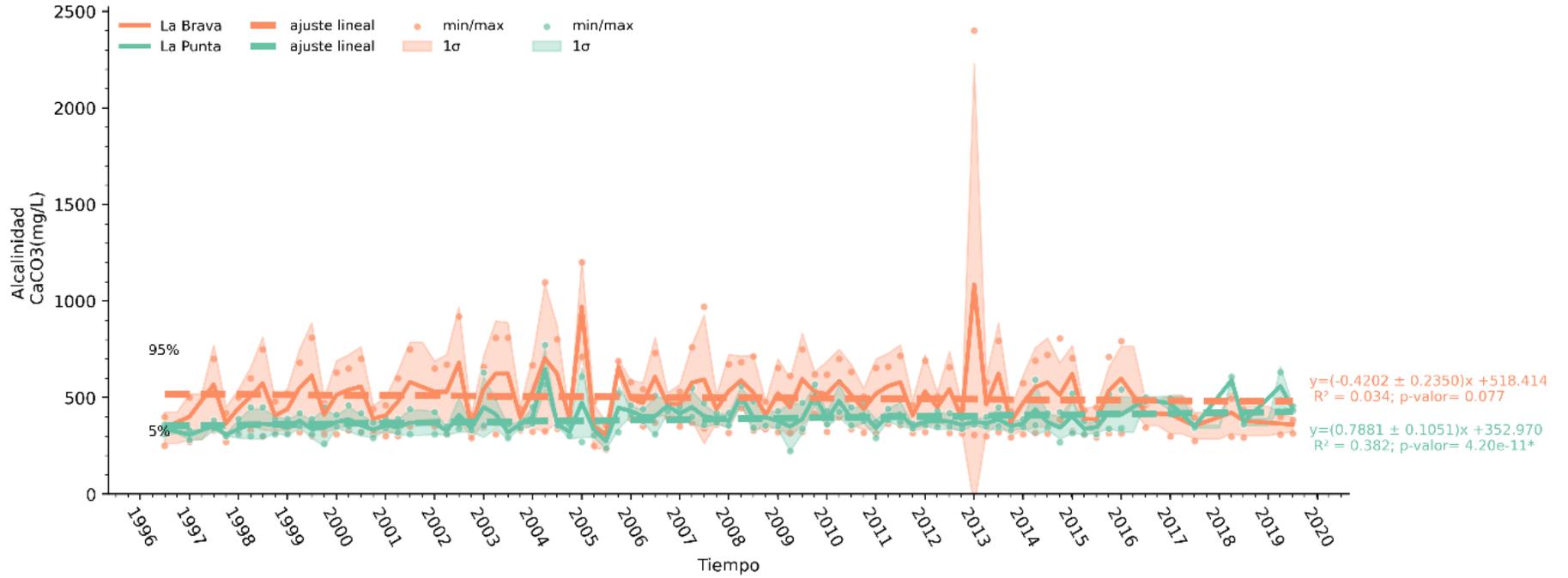


Figura 6-92 Análisis temporal y espacial de alcalinidad de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

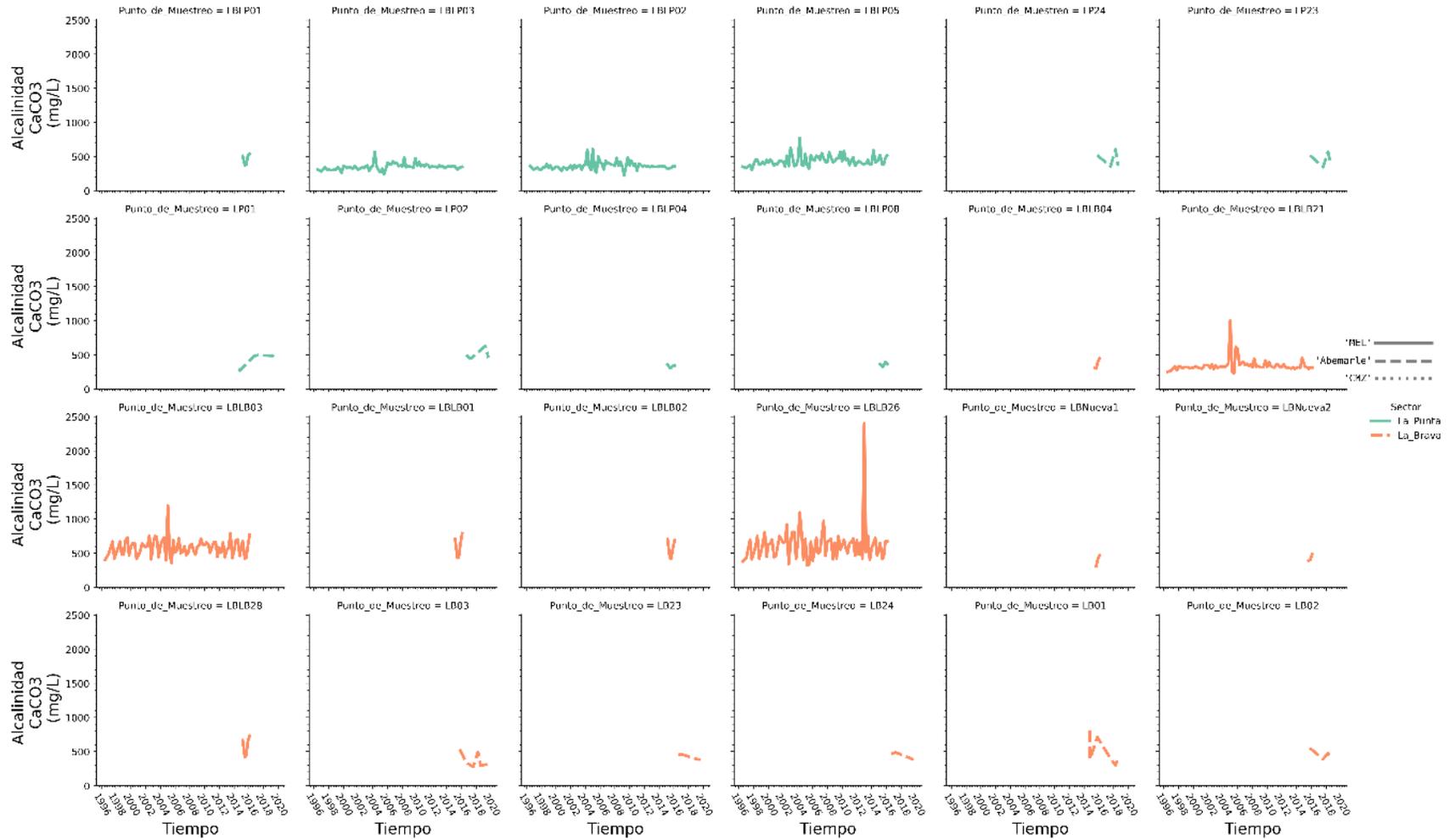


Figura 6-93 Análisis temporal de alcalinidad por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Turbidez (NTU)**

Se analiza el set de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-94), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una leve tendencia a la disminución de turbidez hacia el presente tanto en La Punta como en el sistema lagunar La Brava. El mínimo reportado (0,2 NTU) en otoño 2017 en La Brava y el máximo (32,6 NTU) en verano 2016 en La Punta.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series ambas lagunas muestran una tendencia de disminución significativa de turbidez. La Punta presenta una tendencia negativa, con una pendiente de -0,8504 NTU/año ( $r^2=0,2877$ ; Wtest p-valor < 0,05) hacia el presente, mientras La Brava con una pendiente negativa de -0,1572 NTU/año ( $r^2=0,1988$ ; Wtest p-valor < 0,05).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos parámetros de aguas superficiales presentaron un p-valor <0.05 en el KWtest, excepto turbidez donde no había suficiente continuidad de la serie temporal, por lo que no se pudo determinar correctamente con los datos existentes que puntos de muestreo difieren significativamente entre sí.

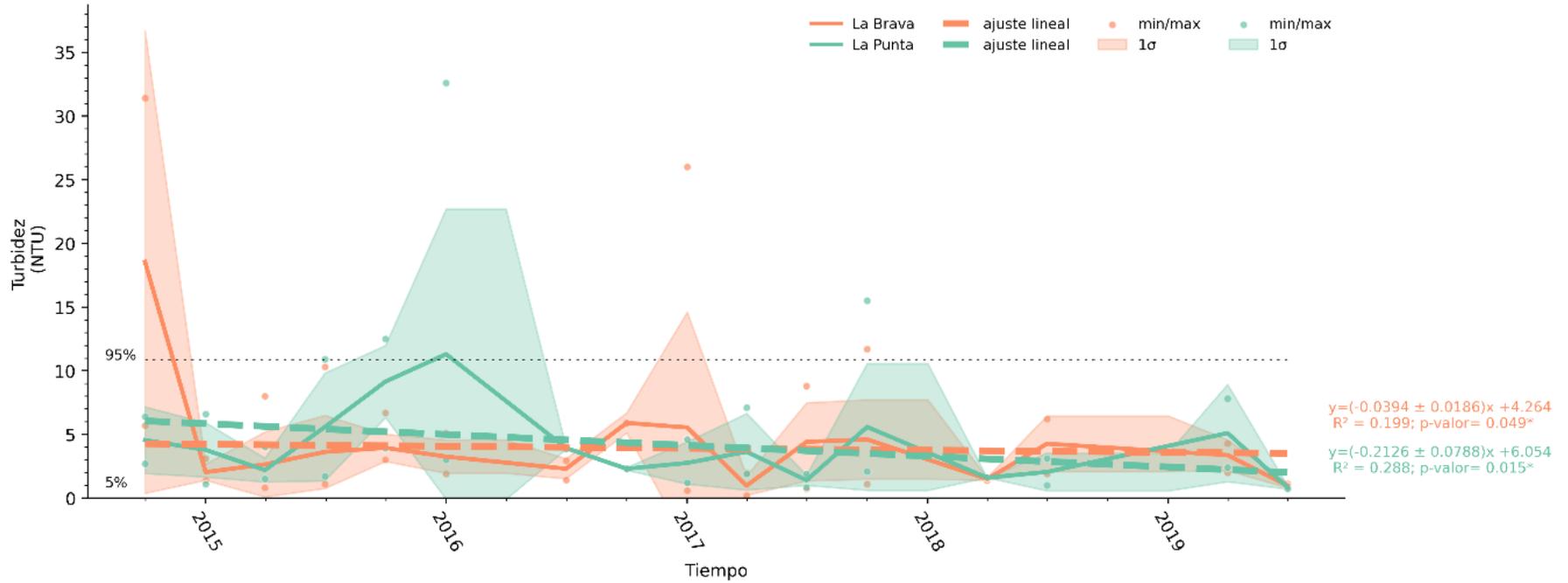


Figura 6-94 Análisis temporal y espacial de turbidez de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

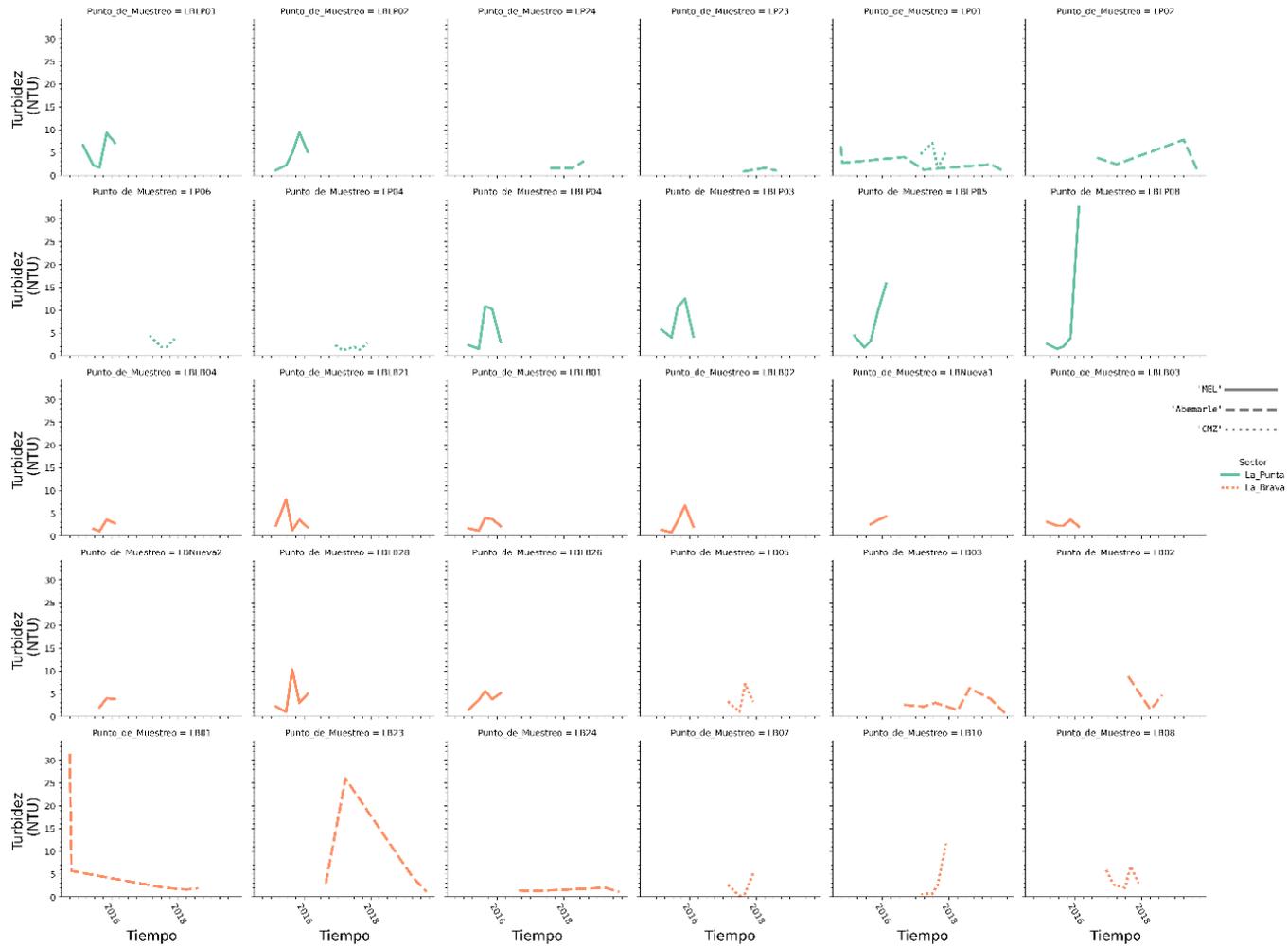


Figura 6-95 Análisis temporal de turbidez por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Sólidos Totales Disueltos (mg/L)**

Se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-96), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó una leve tendencia a la disminución de sólidos totales disueltos hacia el presente tanto en La Punta como en el sistema lagunar La Brava. El mínimo reportado (8659 mg/L) en primavera 2014 en La Punta y el máximo (241805 mg/L) en verano 2002 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que la serie de La Punta presenta una tendencia de disminución significativa, con una pendiente de -415,12 mg/L/año ( $r^2=0,3156$ ; Wtest p-valor < 0,001) hacia el presente, mientras que La Brava con una pendiente negativa de -1492,8 mg/L/año ( $r^2=0,3603$ ; Wtest p-valor < 0,001).

El KWtest (considerando LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26; todo con n=76) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor < 0,001. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-49.

Tabla 6-49 Diferencias en puntos de muestreo de Sólidos Totales Disueltos

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	6,83E-16
LBLB03	LBLP02	2,91E-47
LBLB03	LBLP03	1,96E-31
LBLB03	LBLP05	8,1E-08
LBLB21	LBLB26	1,19E-18
LBLB21	LBLP02	2,32E-09
LBLB21	LBLP03	0,001628
LBLB21	LBLP05	0,01801
LBLB26	LBLP02	4,31E-52
LBLB26	LBLP03	2,24E-35
LBLB26	LBLP05	1,32E-09
LBLP02	LBLP05	2,91E-18
LBLP03	LBLP05	2,9E-09

Fuente: Elaboración propia.

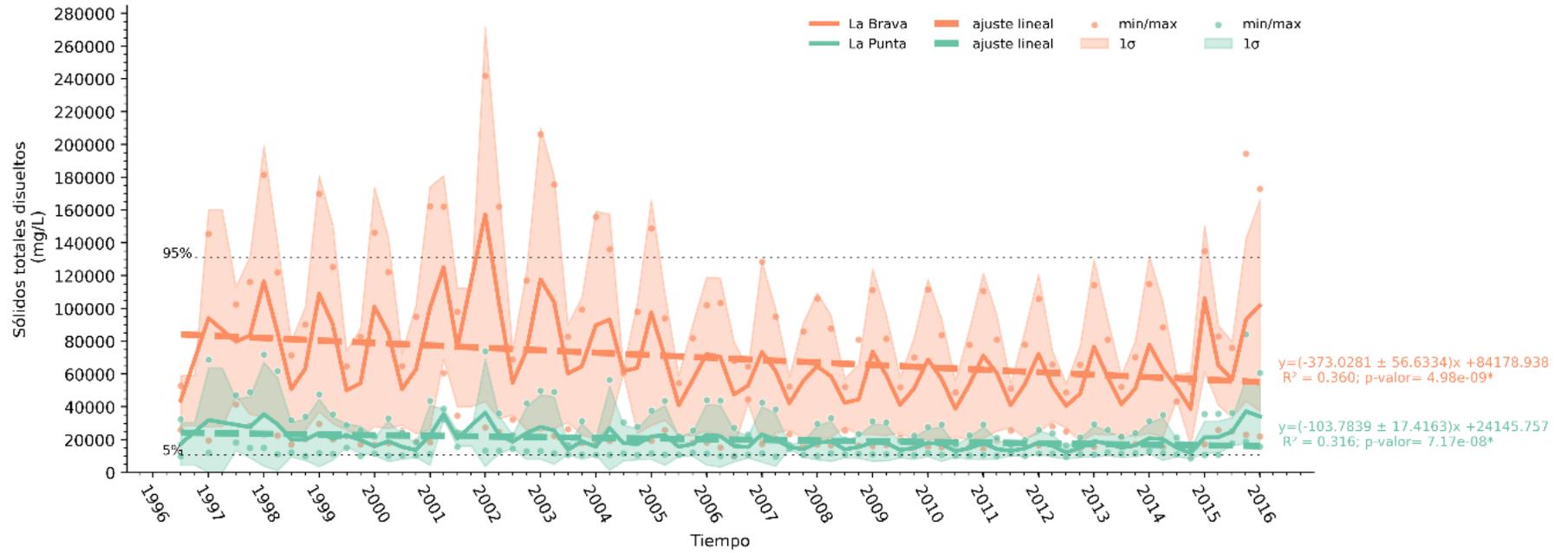


Figura 6-96 Análisis temporal y espacial de sólidos totales disueltos de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

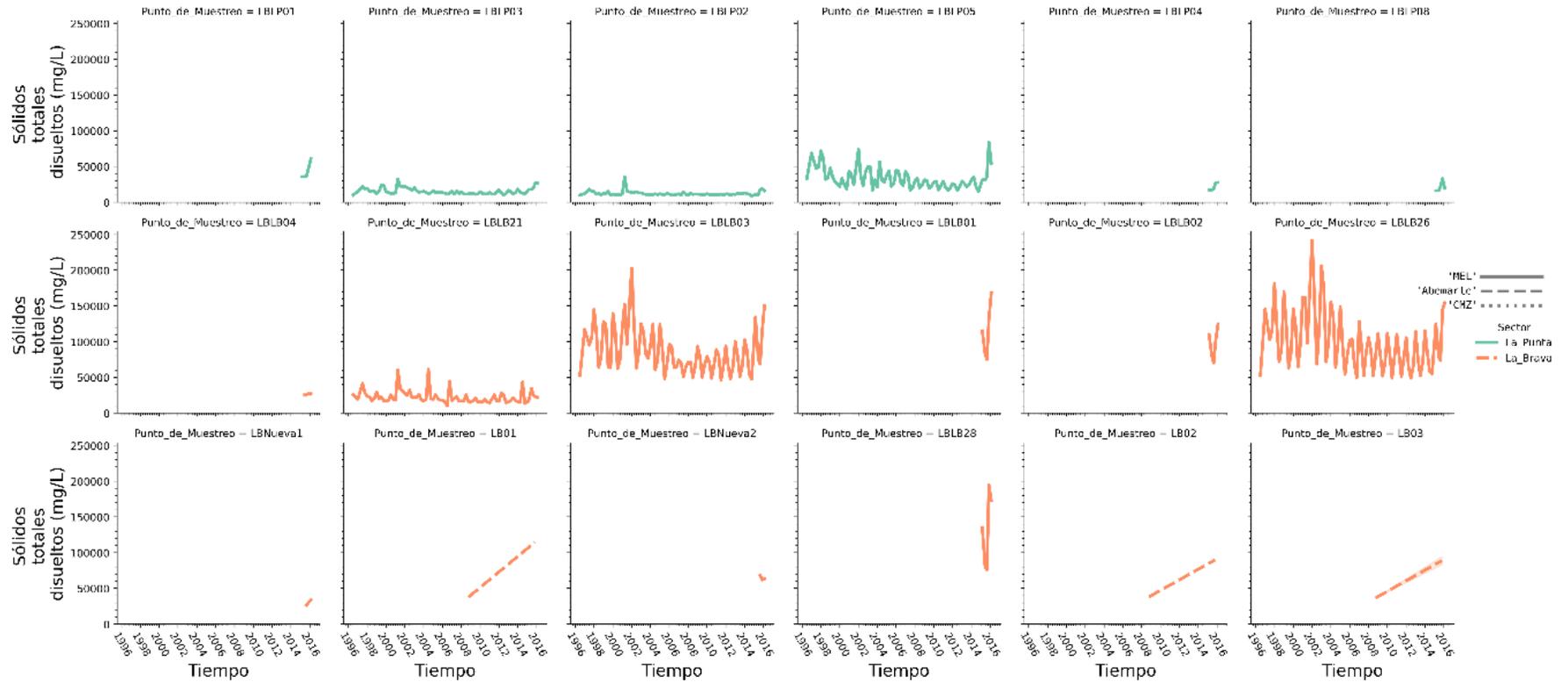


Figura 6-97 Análisis temporal de sólidos totales disueltos por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Sólidos Totales Suspendidos (mg/L)**

Se analiza el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-98), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó tendencia a la disminución de sólidos totales suspendidos hacia el presente tanto en La Punta como en mayor proporción en La Brava. El mínimo reportado (1,62 mg/L) en invierno 2013 en La Punta y el máximo (79,8 mg/L) en otoño 2001 en La Brava.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series de ambas lagunas muestran una tendencia de disminución significativa de sólidos totales suspendidos. La serie de La Punta presenta una tendencia negativa, con una pendiente de -1,7744 mg/L/año ( $r^2=0,5855$ ; Wtest p-valor < 0,001) hacia el presente, mientras que La Brava con una pendiente negativa de -7,3632 mg/L/año ( $r^2=0,5441$ ; Wtest p-valor < 0,001).

El KWtest (considerando LBLP03, LBLP02, LBLP05, LBLB21, LBLB03 y LBLB26; todo con n=75) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor < 0,001. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, entregando como resultado los pares de la Tabla 6-50.

Tabla 6-50 Diferencias en puntos de muestreo de Sólidos Totales Suspendidos

Punto A	Punto B	p-valor
LBLB03	LBLB21	1,52E-10
LBLB03	LBLP02	7,69E-22
LBLB03	LBLP03	1,38E-16
LBLB03	LBLP05	2E-06
LBLB21	LBLB26	1,59E-14
LBLB21	LBLP02	0,008855
LBLB26	LBLP02	1,73E-27
LBLB26	LBLP03	1,56E-21
LBLB26	LBLP05	1,46E-09
LBLP02	LBLP05	1,7E-05
LBLP03	LBLP05	0,004043
LBLB03	LBLB21	1,52E-10
LBLB03	LBLP02	7,69E-22

Fuente: Elaboración propia.

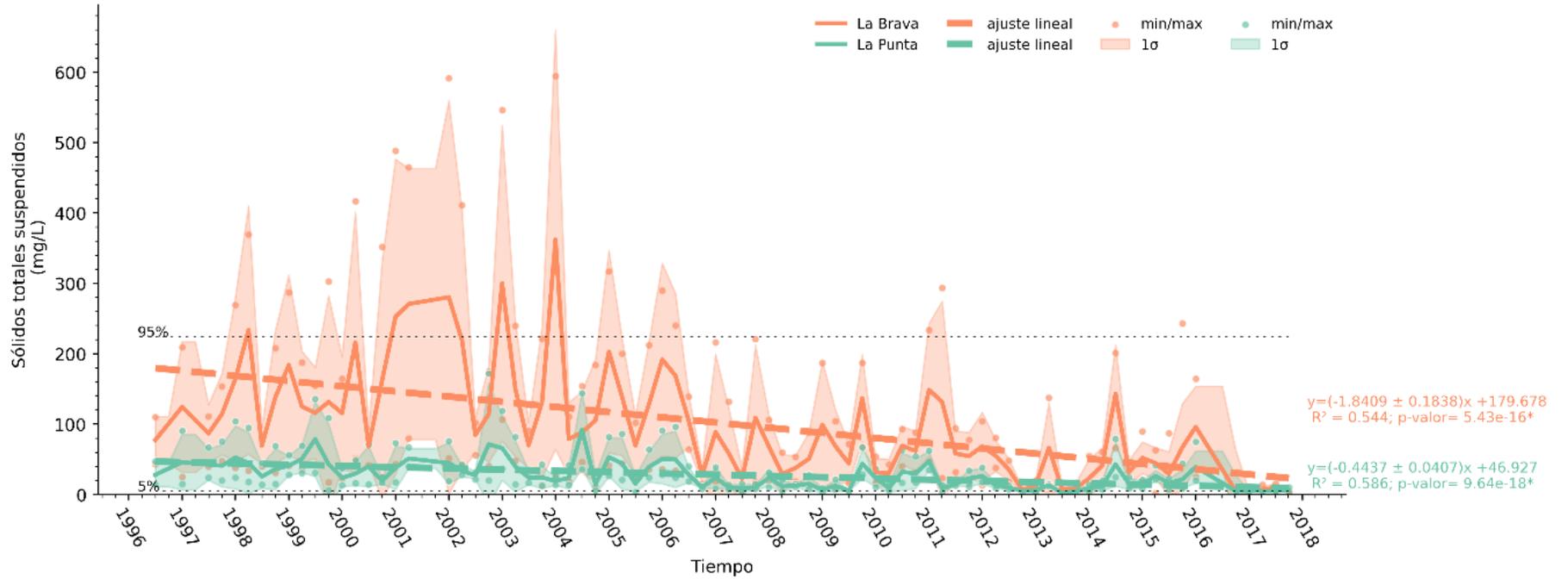


Figura 6-98 Análisis temporal y espacial de sólidos totales suspendidos de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

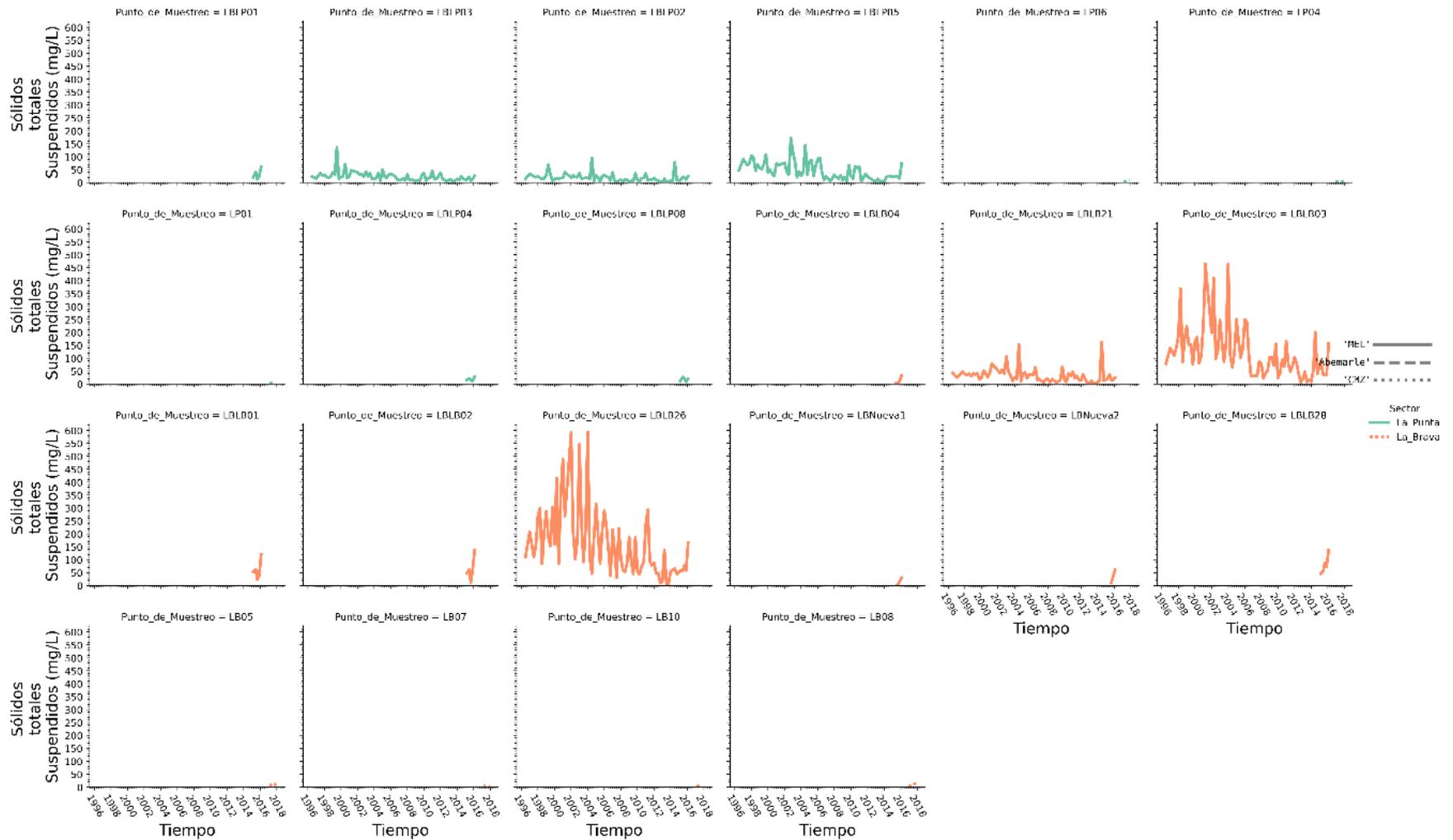


Figura 6-99 Análisis temporal de sólidos totales suspendidos por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.1.13. Otros parámetros de sedimentos de lagunas superficiales

Los resultados de estos parámetros son obtenidos a través de la data generada por Minera Escondida a partir del año 1996 hasta el 2016, con muestreos en las cuatro estaciones del año. Considerando la totalidad de los datos disponibles para otros parámetros de sedimentos de lagunas superficiales, sin diferenciar origen de los datos, se obtienen los estadígrafos de la Tabla 6-51. Es posible observar una gran amplitud de la distribución de los datos al no discriminar entre empresa, puntos de muestreo, lagunas ni estación del año.

Tabla 6-51 Estadígrafos otros parámetros químicos de lagunas superficiales.

Parámetro	Observaciones	Promedio	SD	Mínima	Máxima	Moda	Mediana
Materia Orgánica Sedimento (%)	35	13,10	3,39	6,83	21,77	12,75	12,82
Arsénico Sedimento (mg/Kg)	134	228,51	194,09	8,90	943,00	116,00	138,30
Boro Sedimento (mg/Kg)	134	1.466,29	1.411,99	43,44	9.204,00	1.575,00	1.247,09
Cadmio Sedimento (mg/Kg)	134	0,27	0,50	0,0367	4,45	0,10	0,10
Cobre Sedimento (mg/Kg)	133	25,33	29,32	0,60	127,00	6,00	15,00
Fósforo Sedimento (mg/Kg)	176	63,79	52,77	0,50	319,05	30,00	49,78
Hierro Sedimento (mg/Kg)	134	174,10	161,80	7,00	1.268,00	107,00	123,92
Plomo Sedimento (mg/Kg)	134	1,98	2,88	0,04	15,80	0,70	0,79
Zinc Sedimento (mg/Kg)	134	6,88	8,68	0,04	75,75	5,00	5,00

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se presentan los datos de manera espacial, por laguna (Tabla 6-52). Se observa que Laguna La Punta registra el máximo de arsénico sedimento (943 mg/Kg), el mayor valor de boro sedimento (9240 mg/Kg), valores máximos de cadmio sedimento (4,45 mg/Kg), hierro sedimento (1268 mg/Kg) y materia orgánica sedimento (21,77 %). En tanto, los valores máximos de cobre sedimento (127 mg/Kg) y zinc sedimento (75,75 mg/Kg) se registran en Laguna La Brava.

Tabla 6-52 Estadígrafos por laguna de metales

Parámetro	Arsénico Sedimento (mg/Kg)		Boro Sedimento (mg/Kg)		Cadmio Sedimento (mg/Kg)		Cobre Sedimento (mg/Kg)		Hierro Sedimento (mg/Kg)		Materia Orgánica Sedimento (mg/Kg)		Fósforo Sedimento (mg/Kg)		Plomo Sedimento (mg/Kg)		Zinc Sedimento (mg/Kg)	
	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP
N observaciones	86,00	48,00	86,00	48,00	86,00	48,00	85,00	48,00	86,00	48,00	21,00	14,00	111,00	65,00	86,00	48,00	86,00	48,00
Promedio	286,47	124,67	2.006,77	497,93	0,35	0,14	25,07	25,81	216,69	97,80	14,20	11,45	74,55	45,43	2,34	1,36	7,14	6,42
SD	217,33	63,38	1.461,39	535,97	0,62	0,09	24,01	37,21	179,04	82,78	3,73	1,96	56,74	39,24	3,36	1,58	6,92	11,25
Mínima	15,60	8,90	270,20	43,44	0,04	0,04	1,04	0,60	7,00	12,50	6,83	6,96	0,50	0,50	0,04	0,04	0,04	0,60
Máxima	943,00	341,00	9.204,00	2.662,00	4,45	0,40	123,80	127,00	1.268,00	335,00	21,77	13,66	319,05	185,00	15,80	6,80	49,10	75,75
MWtest (p-valor)	1,66169E-10		1,13115E-11		0,000277575		1,49042E-07		4,47298E-14		0,000129326		4,58143E-06		0,021791307		0,006560616	
Dif.sig.	sí		sí		sí		sí		sí		sí		sí		sí		sí	

Fuente: Elaboración propia. Dif.sig: diferencia significativa; LB: La Brava; LP; La Punta

- **Arsénico Sedimento (mg/Kg)**

Analizando el set de datos a una resolución temporal estacional para ambas lagunas (Figura 6-100), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de arsénico sedimento presenta tendencia al aumento para ambas lagunas. Ambas curvas difieren significativamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest). Por otra parte, ambas series de tiempo muestran variabilidad estacional, con mayores valores de concentraciones en invierno y menores en verano.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series de tiempo (2004 a 2015) presentan tendencias de aumento significativo de concentraciones de arsénico sedimento, donde se obtiene que el aumento observado tiene una pendiente en La Punta de 5,7644 mg/Kg/año ( $r^2=0,3224$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ) y en La Brava una pendiente de 8,579 mg/Kg/año ( $r^2=0,1181$ ; Wtest p-valor  $< 0,05$ ).

El KWtest (considerando LBLP03, LBLB03, LBLB26; todo con  $n=33$ ) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ . Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, como es el caso de LBLB26 y LBLP03 con un p-valor  $< 0,05$ .

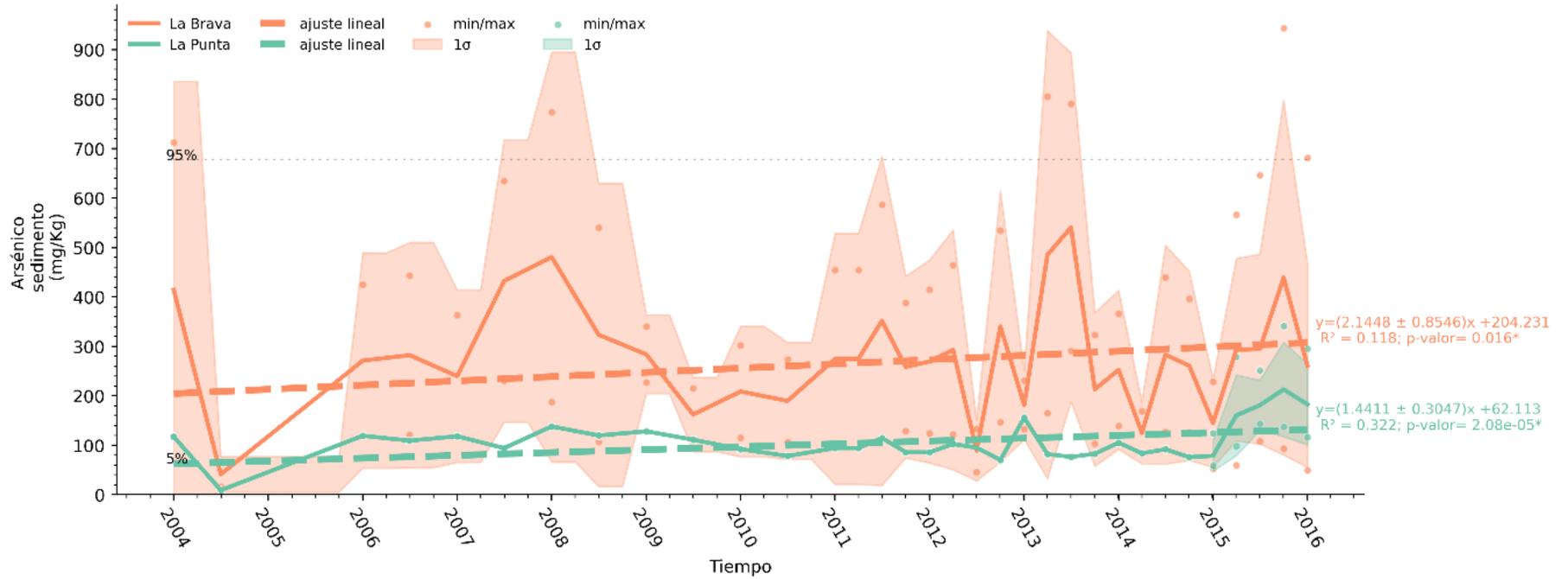


Figura 6-100 Análisis temporal y espacial de arsénico sedimento de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

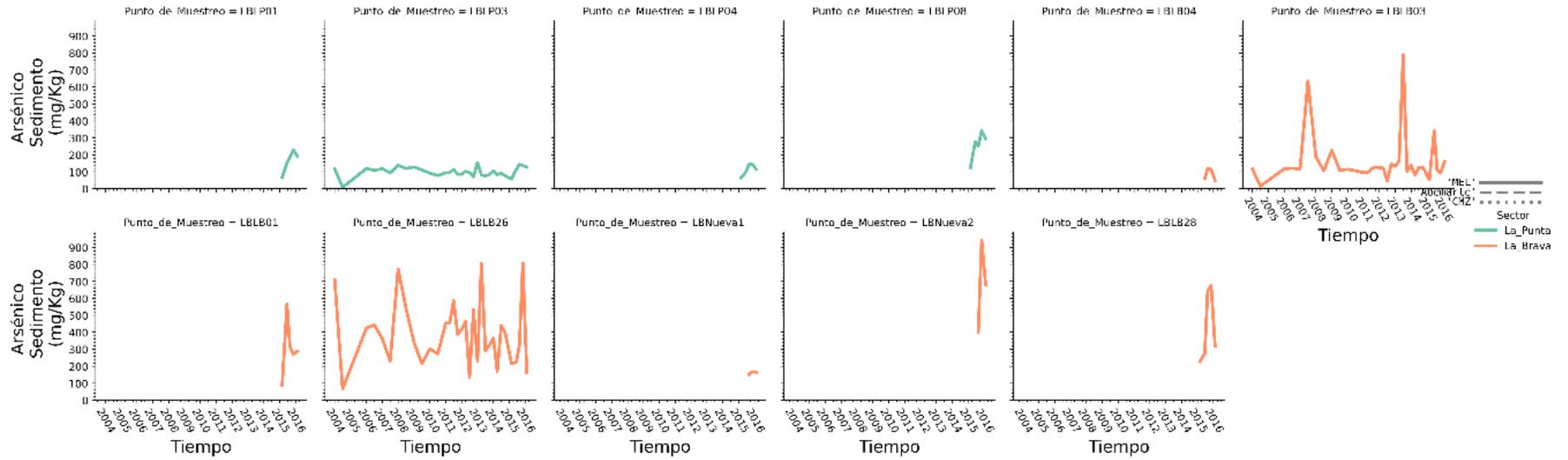


Figura 6-101 Análisis temporal de arsénico sedimento por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Boro Sedimento (mg/Kg)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-102), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de boro sedimento presenta una leve tendencia a la baja a partir del año 2004 para ambas lagunas. El conjunto de ambas lagunas difiere significativamente entre sí con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest).

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series de ambas lagunas presentan coeficientes de determinación inferior a 0,10 por lo que no hay correspondencia con un modelo lineal y por lo tanto no se puede afirmar una tendencia de aumento o disminución con respaldo estadístico, para el período de 2004 a 2015.

El KWtest (considerando LBLP03, LBLB03, LBLB26; todo con  $n=33$ ) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ . Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, como es el caso de LBLB03 y LBLP03 con un p-valor  $< 0,05$ , y a su vez, se observaron diferencias significativas entre los puntos de muestreo LBLB26 Y LBLP03 con un p-valor  $< 0,05$ .

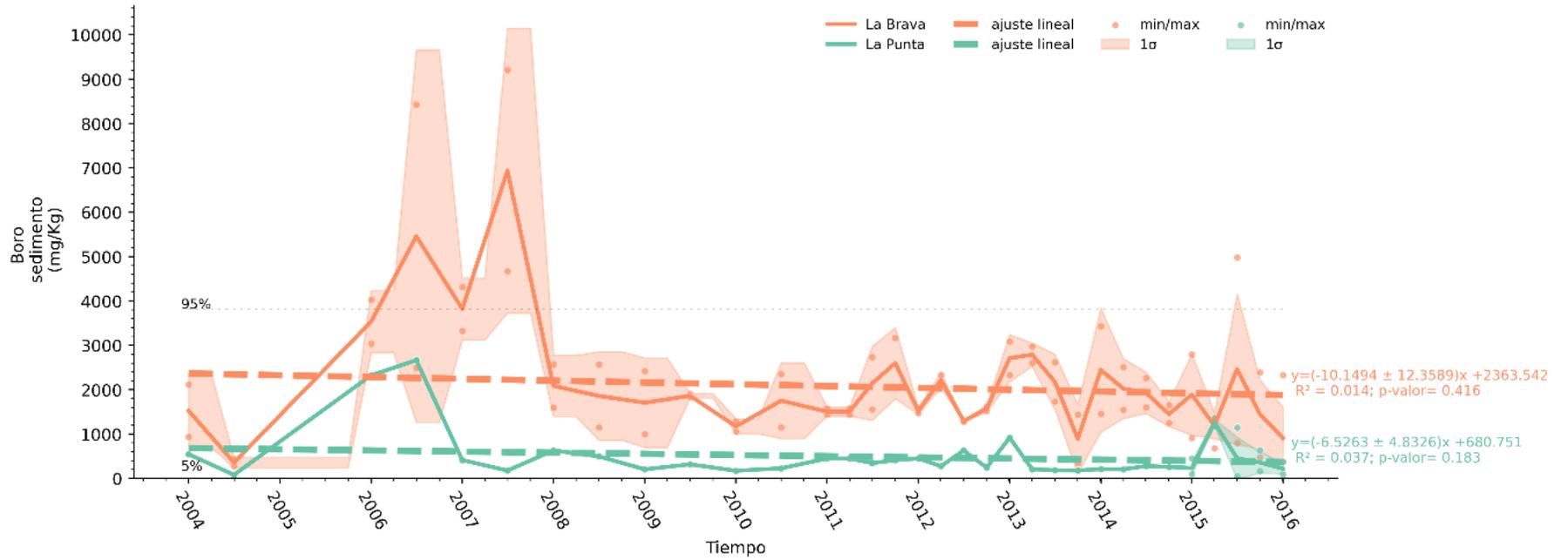


Figura 6-102 Análisis temporal y espacial de boro sedimento de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

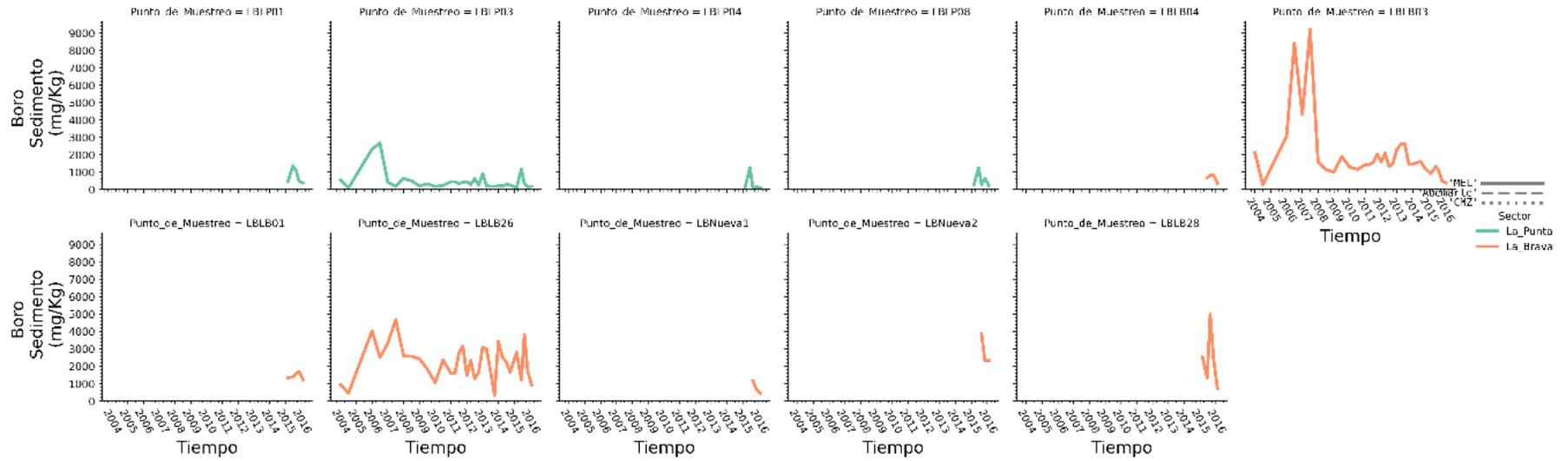


Figura 6-103 Análisis temporal de boro sedimento por estación de muestreo y por empresa.

Fuente: Elaboración propia.

- **Cadmio Sedimento (mg/Kg)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-104), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de cadmio sedimento presenta una leve tendencia a la baja a partir del año 2004 para ambas lagunas. Ambas curvas difieren estadísticamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest).

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie del sistema lagunar La Punta presenta tendencias de aumento significativo de concentraciones de cadmio sedimento con una pendiente de  $0,0052 \text{ mg/Kg/año}$  ( $r^2=0,1113$ ; Wtest p-valor  $< 0,05$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-105), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo. Este análisis se realizó con los puntos de muestreo LBLP03, LBLB03, y LBLB26 (todos con  $n=33$ ), ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones. El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando los datos del período 2004 a 2015. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, pero no se obtuvo ningún par de estaciones con un p-valor  $> 0,05$ , por lo que no hay evidencia de qué puntos estarían difiriendo de otros.

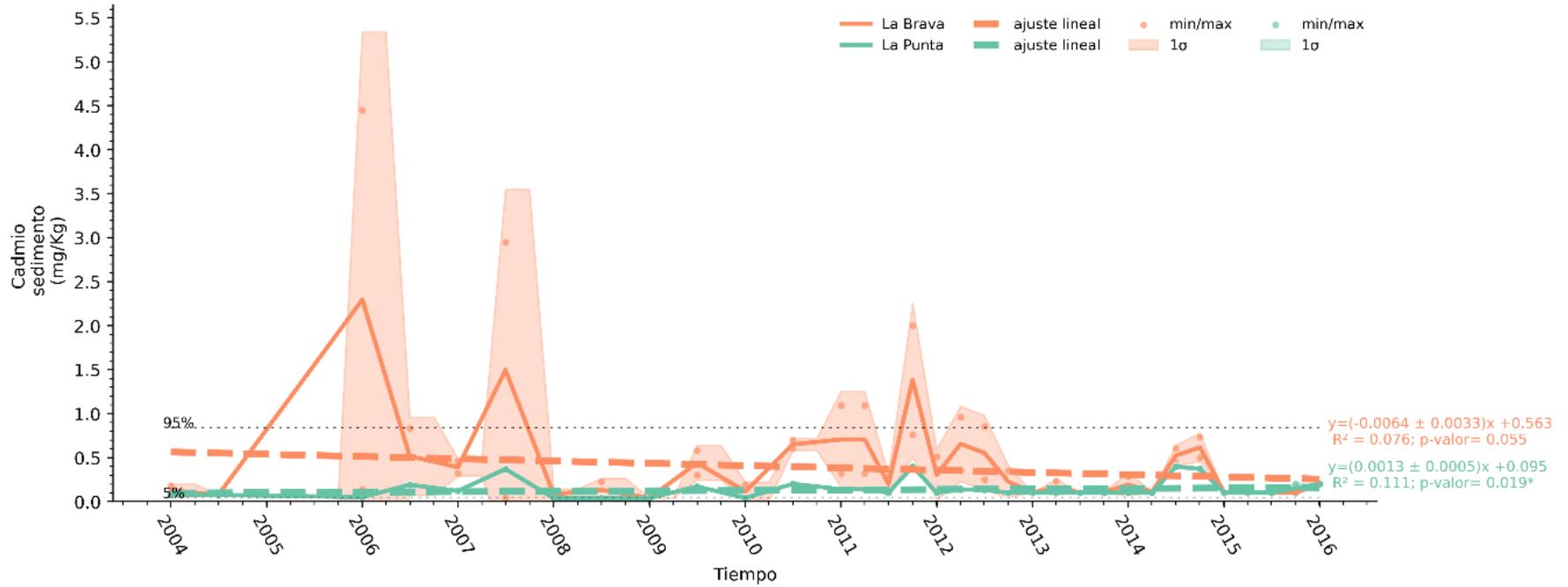


Figura 6-104 Análisis temporal y espacial de cadmio sedimento de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

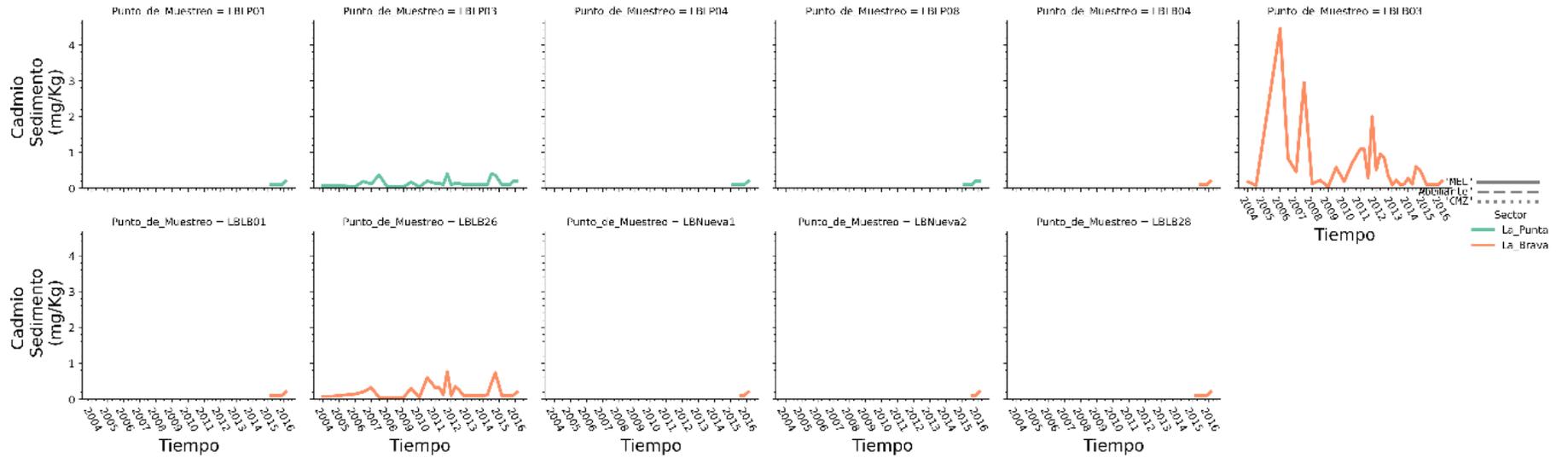


Figura 6-105 Análisis temporal de cadmio sedimento por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Cobre Sedimento (mg/Kg)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional para ambas lagunas (Figura 6-106), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de cobre sedimento presenta una tendencia al aumento a partir del año 2004 para ambas lagunas, además de dos aumentos en el año 2007 en La Brava y en el año 2015 también en La Brava y en mayor magnitud en La Punta. Ambos conjuntos difieren significativamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest).

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie del sistema lagunar de La Punta presenta tendencia de aumento significativo de concentraciones de cobre sedimento, cuya pendiente es  $2,5912 \text{ mg/Kg/año}$  ( $r^2=0,4116$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ). En tanto, para la serie de La Brava se obtiene un coeficiente de determinación menor a  $0,10$ .

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-107), se visualizan solo algunas series de tiempo de longitud adecuada para realizar comparaciones entre puntos de muestreo. Este análisis se realizó con los puntos de muestreo LBLP03 ( $n=33$ ), LBLB03 ( $n=33$ ), y LBLB26 ( $n=32$ ), ya que solo éstas presentaban suficientes observaciones. El KWtest arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ , utilizando los datos del período 2004 a 2015. Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, pero no se obtuvo ningún par de estaciones con un p-valor  $> 0,05$ , por lo que no hay evidencia de qué puntos estarían difiriendo de otros.

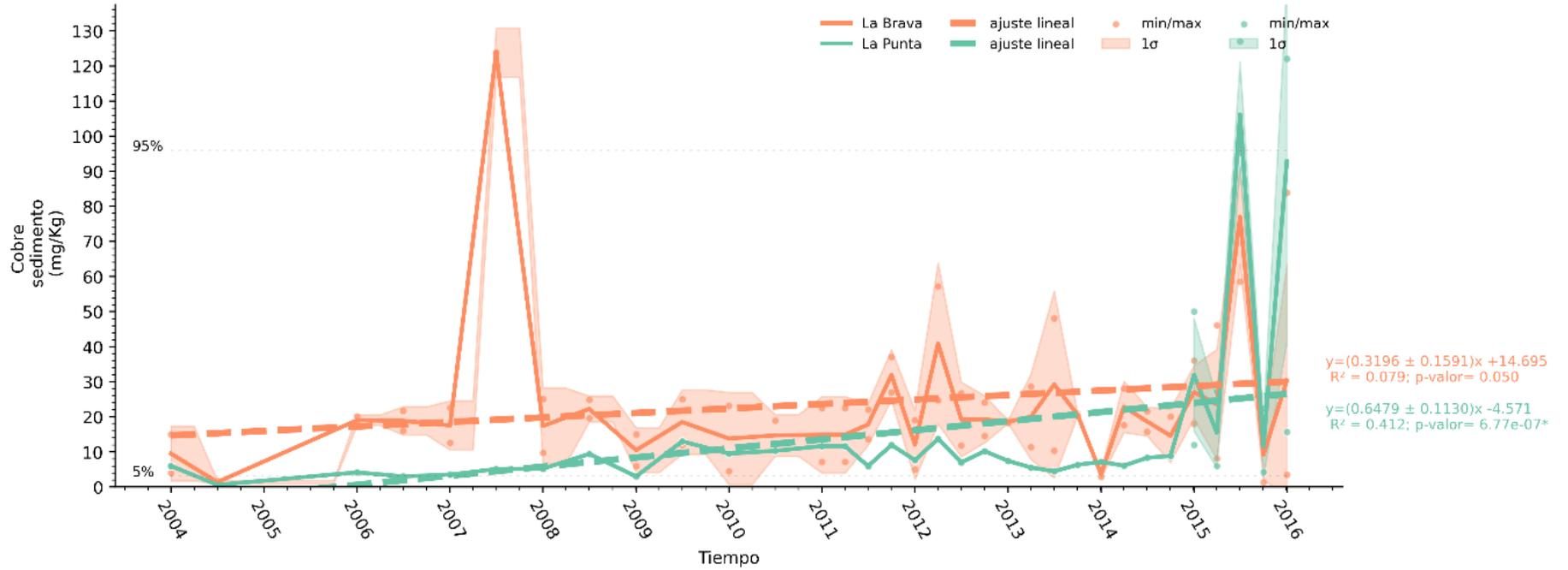


Figura 6-106 Análisis temporal y espacial de cobre sedimento de las Laguna La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

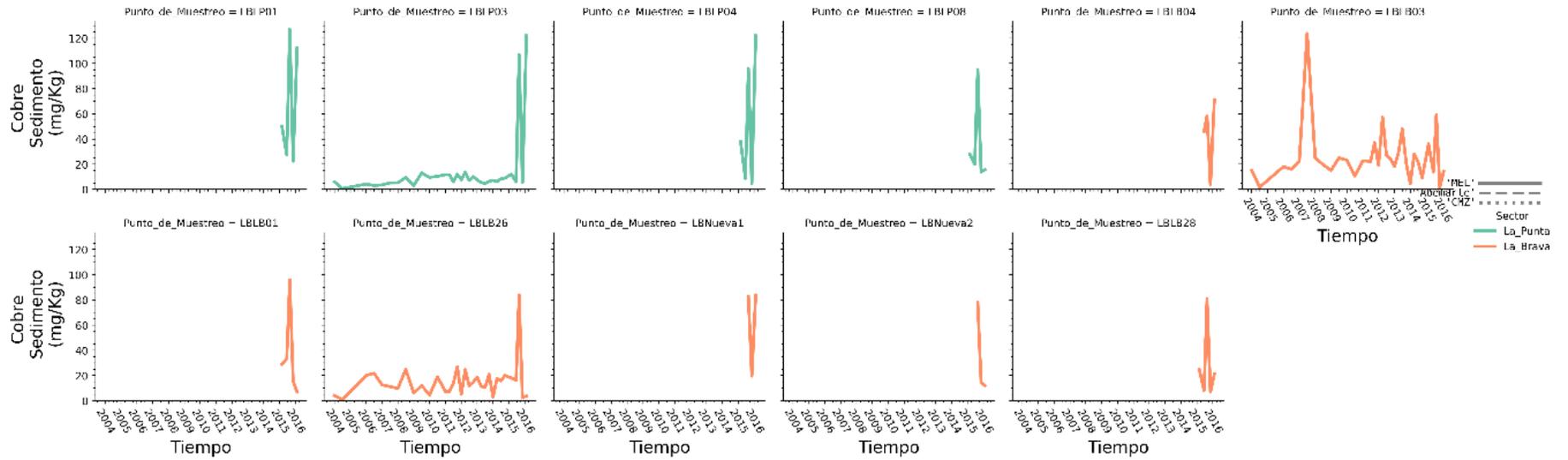


Figura 6-107 Análisis temporal de cobre sedimento por estación de muestreo y por empresa.

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cobre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

- **Hierro Sedimento (mg/Kg)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional para ambas lagunas (Figura 6-108), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de hierro sedimento presenta tendencia al aumento en La Punta y tendencia a la disminución en La Brava. Ambos conjuntos difieren significativamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest).

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie del sistema lagunar de La Punta presenta tendencias de aumento significativo de concentraciones de hierro sedimento, con un la pendiente de  $4,822 \text{ mg/Kg/L}$  ( $r^2=0,2179$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ). En tanto, para la serie de La Brava se obtiene un coeficiente de determinación menor a  $0,10$ .

El KWtest (considerando LBLP03, LBLB03, LBLB26; todo con  $n=33$ ) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ . Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, como es el caso de LBLB03 y LBLP03 con un p-valor  $< 0,05$ .

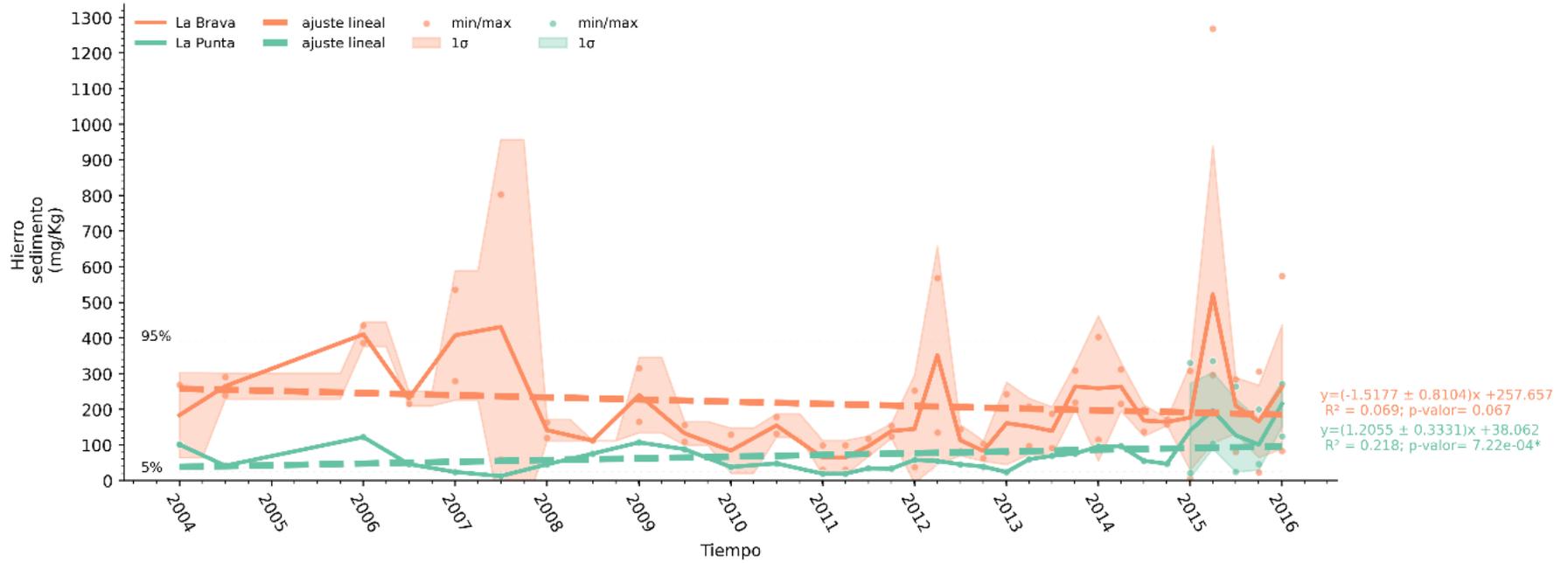


Figura 6-108 Análisis temporal y espacial de hierro sedimento de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre ± una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

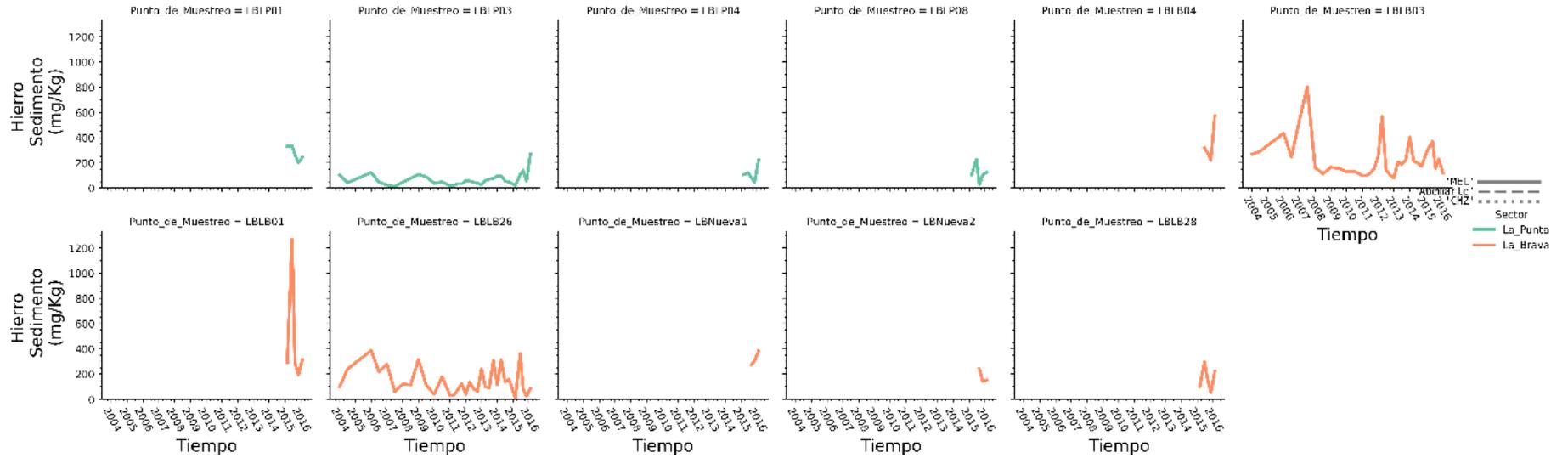


Figura 6-109 Análisis temporal de hierro sedimento por estación de muestreo y por empresa.

Fuente: Elaboración propia.

- **Materia Orgánica Sedimento (%)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional para ambas lagunas (Figura 6-110), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de materia orgánica sedimento presenta una tendencia al aumento a partir del año 2016 para ambas lagunas. Ambos conjuntos difieren significativamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest).

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que, si bien hay una leve correspondencia con un modelo lineal para las dos series, no se obtiene una pendiente significativamente distinta a cero. De este modo, no se puede afirmar una tendencia de aumento o disminución significativa (La Punta  $r^2=0,289$ ; Wtest p-valor  $> 0,05$ ; La Brava  $r^2=0,186$ ; Wtest p-valor  $> 0,05$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, algunos parámetros de sedimentos presentaron un p-valor  $< 0.05$  en el KWtest, excepto materia orgánica sedimento, donde no había suficiente continuidad de la serie temporal, por lo que no se puede determinar correctamente si hay alguna diferencia significativa entre algún punto de muestreo.

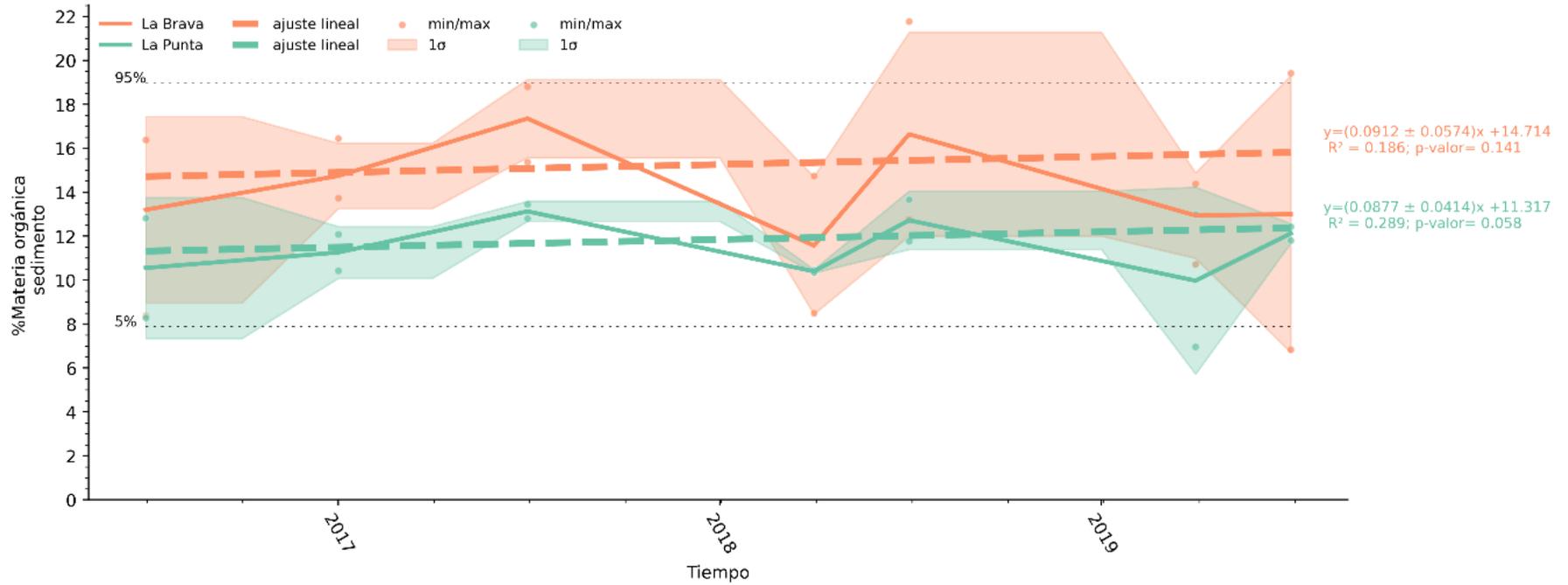


Figura 6-110 Análisis temporal y espacial de materia orgánica sedimento de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

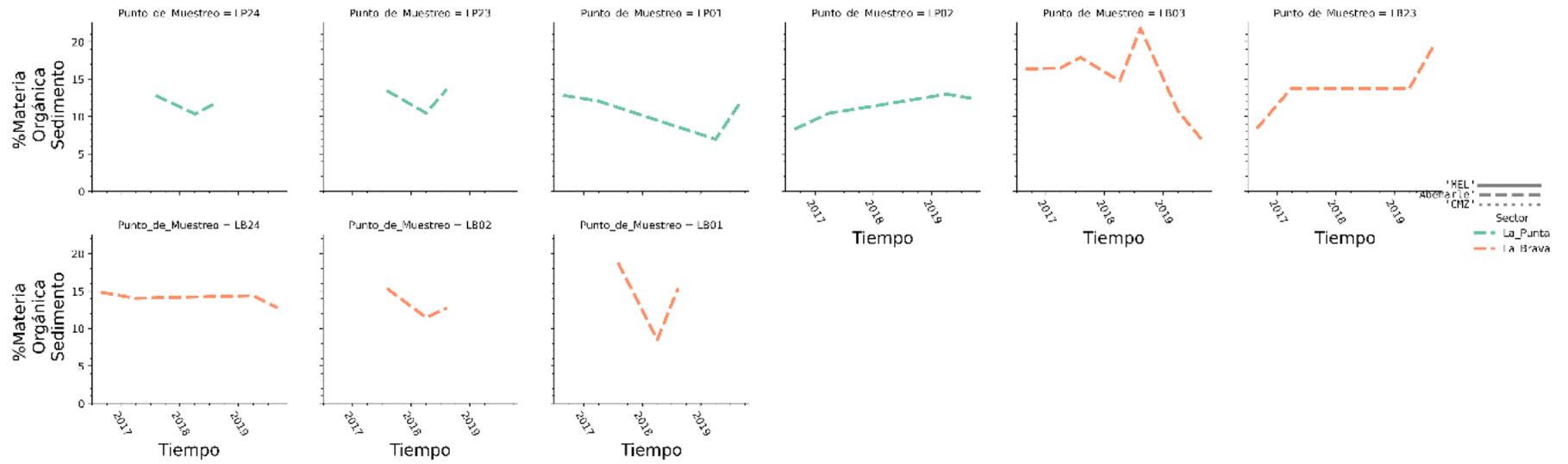


Figura 6-111 Análisis temporal de materia orgánica sedimento por estación de muestreo y por empresa.

Fuente: Elaboración propia.

- **Fósforo Sedimento (mg/Kg)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional (promediado estacionalmente) para ambas lagunas (Figura 6-112), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de fósforo sedimento presenta tendencia al aumento tanto en La Punta como en La Brava. Ambos conjuntos difieren estadísticamente con un p-valor  $< 0,001$  (MWtest).

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series de ambos sistemas lagunares presentan tendencias de aumento significativo de concentración de fósforo sedimento, donde la pendiente para la serie de La Punta es  $0,344 \text{ mg/Kg/año}$  ( $r^2=0,3715$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ) y en La Brava de  $3,807 \text{ mg/Kg/año}$  ( $r^2=0,0198$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, el KWtest (considerando LBLP03, LBLB03, LBLB26; todo con  $n=33$ ) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,001$ . Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí, como es el caso de LBLB03 y LBLP03 con un p-valor  $< 0,05$ .

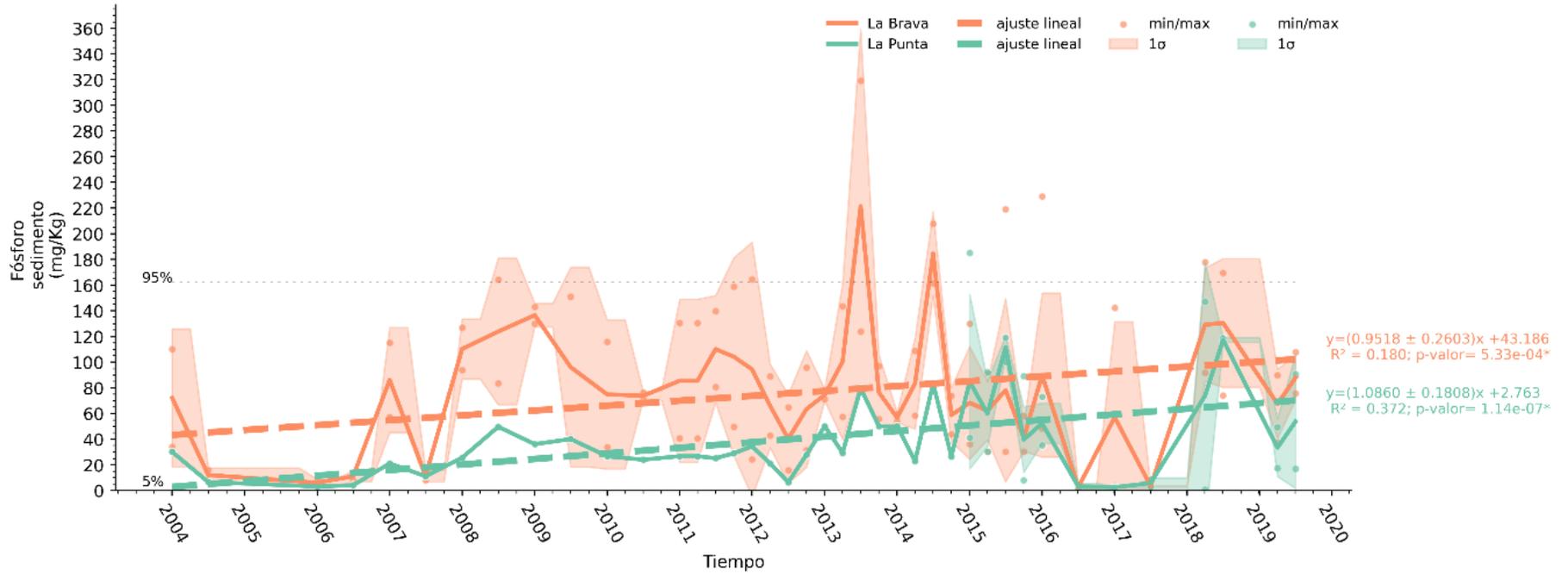


Figura 6-112 Análisis temporal y espacial de fósforo sedimento de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.



Figura 6-113 Análisis temporal de fósforo sedimento por estación de muestreo y por empresa.

Fuente: Elaboración propia.

- **Plomo Sedimento (mg/Kg)**

Analizando el set de datos a una resolución temporal estacional para ambas lagunas (Figura 6-114), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de plomo sedimento presenta una tendencia a la disminución a partir del año 2004 para ambas lagunas. Ambos conjuntos no difieren significativamente con un p-valor  $> 0,05$  (MWtest).

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que en las series ambos sistemas lagunares los coeficientes de determinación obtenidos son inferiores a 0,10, por lo que, a falta de una correspondencia con un modelo lineal, es imposible afirmar un aumento o disminución con respaldo estadístico (La Punta  $r^2=0,004$ ; Wtest p-valor 0,649; La Brava  $r^2=0,061$ ; Wtest p-valor  $> 0,05$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, el KWtest (considerando LBLP03, LBLB03, LBLB26; todo con  $n=33$ ) arroja como resultado que no existen diferencias significativas entre ningún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $> 0,05$ , para el período de 2004 a 2015.

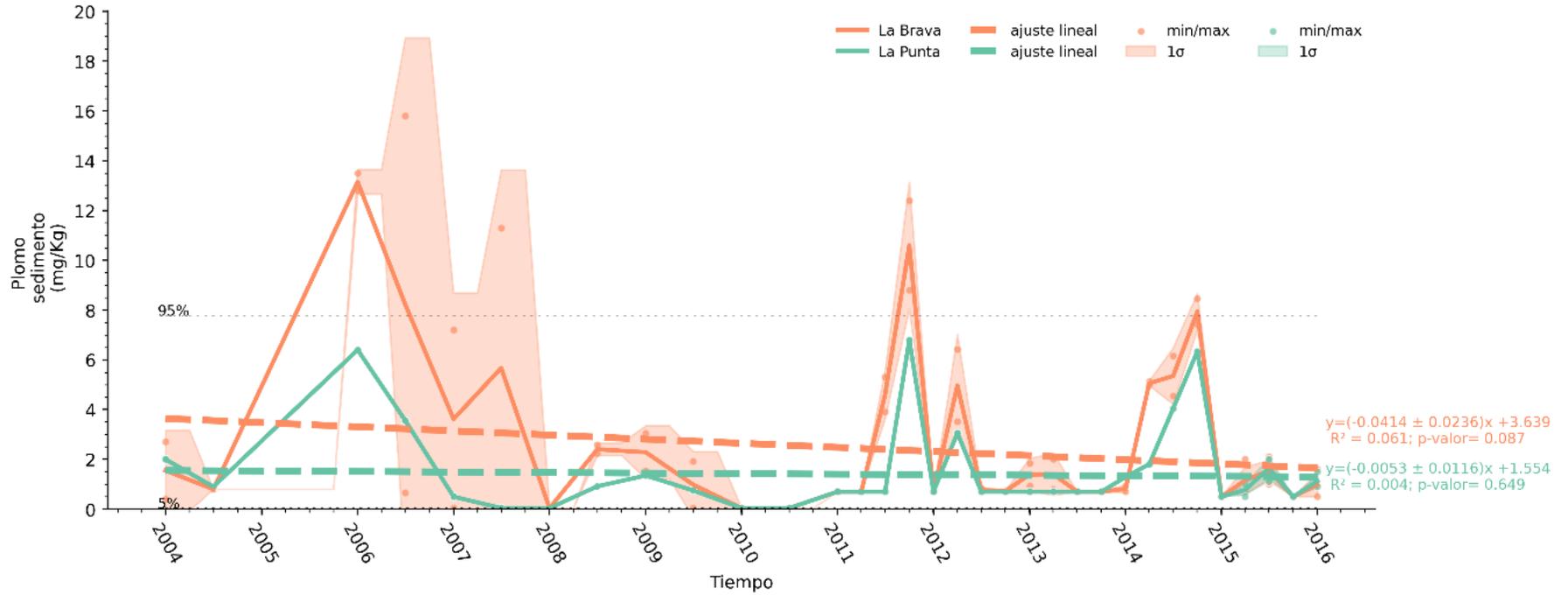


Figura 6-114 Análisis temporal y espacial de plomo sedimento de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

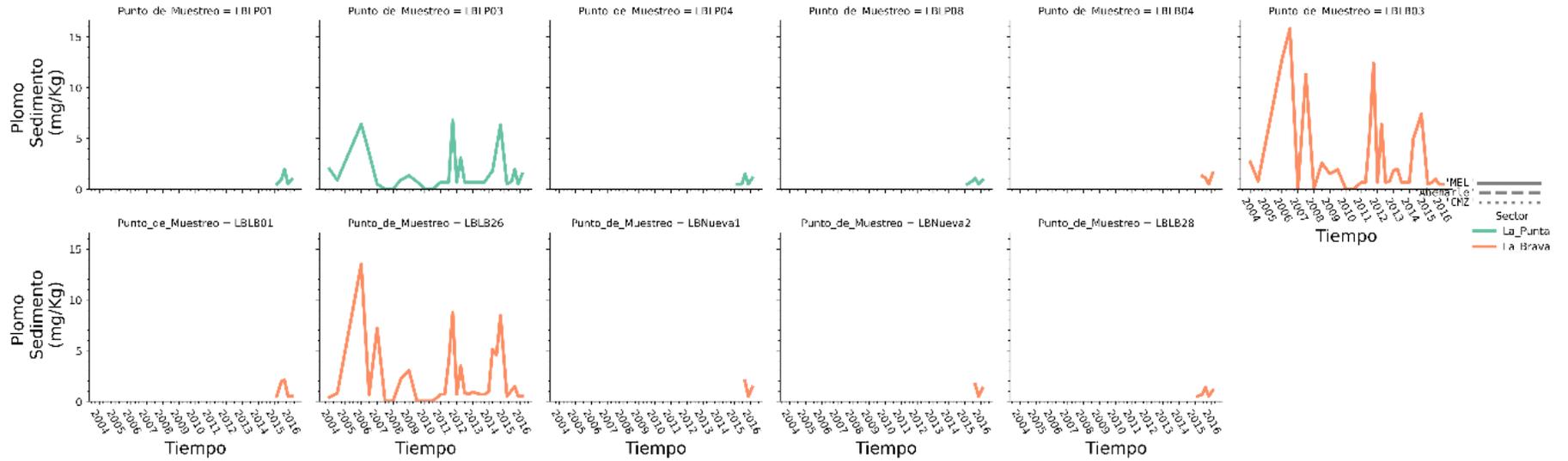


Figura 6-115 Análisis temporal de plomo sedimento por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

- **Zinc Sedimento (mg/Kg)**

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional para ambas lagunas (Figura 6-116), indicando la dispersión de los datos ( $\pm 1 \sigma$ ) y señalando los valores mínimos y máximos por período, se observó que la curva de zinc sedimento presenta una leve tendencia al aumento a partir del año 2004 para ambas lagunas. Ambos conjuntos difieren significativamente con un p-valor  $< 0,05$  (MWtest).

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que en las series ambos sistemas lagunares los coeficientes de determinación obtenidos son inferiores a 0,10, por lo que, a falta de una correspondencia con un modelo lineal, es imposible afirmar un aumento o disminución con respaldo estadístico (La Punta  $r^2=0,053$ ; Wtest p-valor  $> 0,05$ ; La Brava  $r^2=0,010$ ; Wtest p-valor  $> 0,05$ ).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo, el KWtest (considerando LBLP03, LBLB03, LBLB26; todo con  $n=33$ ) arroja como resultado que existen diferencias significativas entre algún par de puntos de muestreo, con un p-valor  $< 0,05$ . Posteriormente se aplicó el test *post-hoc* Dtest para determinar qué puntos de muestreo difieren entre sí pero no se encontró evidencia de qué punto difiere otro, dado los p-valores sobre 0,05.

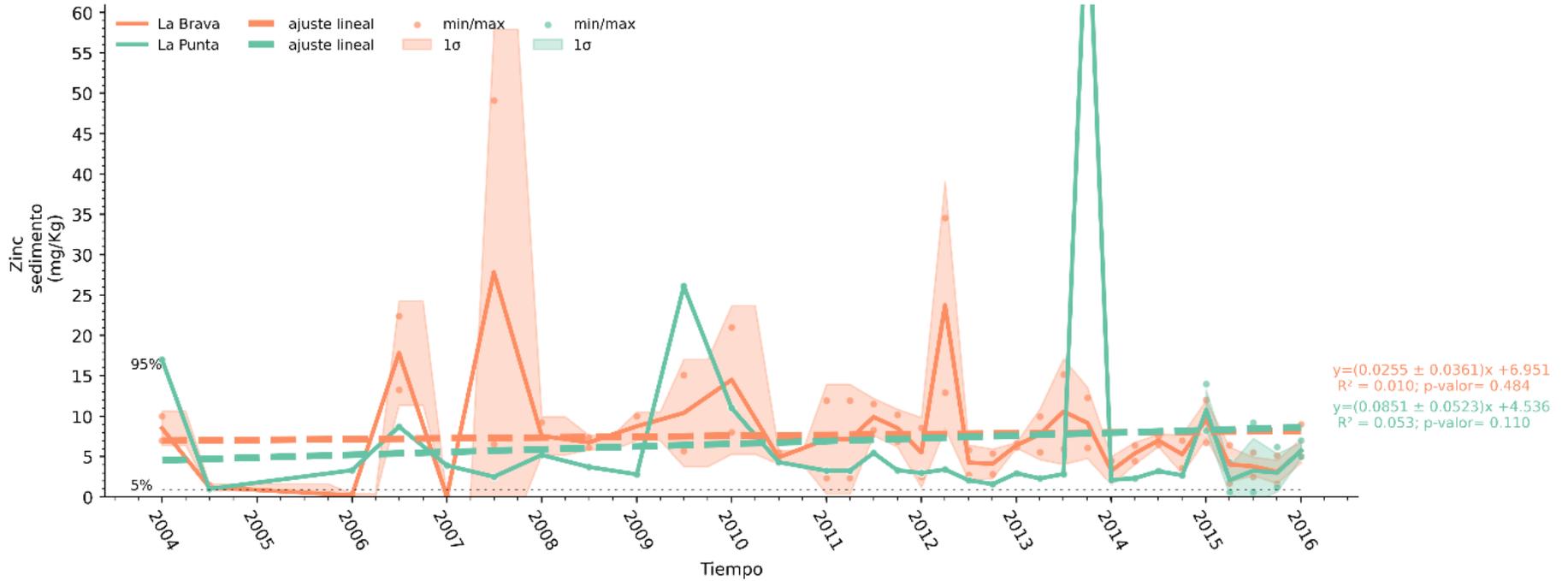


Figura 6-116 Análisis temporal y espacial de zinc sedimento de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

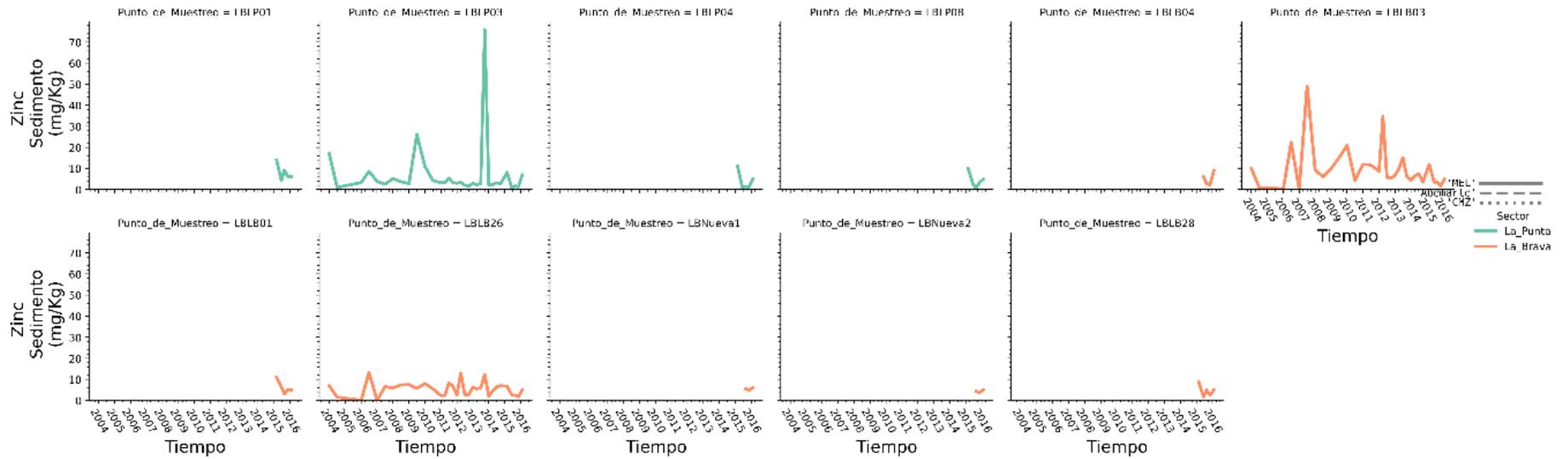


Figura 6-117 Análisis temporal de zinc sedimento por estación de muestreo y por empresa

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.2. Variables respuesta

De acuerdo a lo definido en el capítulo 5, se consideran variables respuesta a las comunidades acuáticas monitoreadas en las lagunas La Punta y La Brava clasificadas en Fitobentos (FB), Fitoplancton (FP), Zoobentos (ZB) y Zooplancton (ZP). Para el análisis se utilizaron las densidades totales (D) de individuos o células por unidad de área (ej.: cél/mm<sup>2</sup>) o volumen (ej.: cél/L), la riqueza taxonómica (S) y el índice de diversidad (H).

Los resultados para estos parámetros son obtenidos a través de la data generada entre octubre 2013 y julio de 2019, con muestreos en las cuatro estaciones del año, obtenidos por Minera Escondida, y con muestreos semestrales en invierno y verano obtenidos por Albemarle. En total se recopilaron resultados de 16 campañas de muestreo, realizadas tanto por Albemarle Corporation (12 campañas de muestreo efectivas) y Minera Escondida Ltda (5 campañas de muestreo efectivas).

Considerando la totalidad de los datos disponibles para las variables bióticas de lagunas superficiales, sin diferenciar origen de los datos, se obtienen los estadígrafos de la Tabla 6-53. Es posible observar una gran amplitud de la distribución de los datos al no discriminar entre empresa, puntos de muestreo, lagunas ni estación del año.

Tabla 6-53 Estadística descriptiva para las variables bióticas del Sistema La Punta-La Brava.

Variable	N Observaciones	Promedio	SD	Mínima	Máxima	Moda	Mediana
FPD (cél/mL)	176	527,58	1771,77	0,00	10110,38	0,00	36,84
FPS	176	9,70	5,96	0,00	33,00	6,00	9,00
FPH	137	1,50	0,63	0,00	2,80	1,68	1,59
FBD (cél/mm <sup>2</sup> )	175	82803,00	229077,08	0,40	2347919,00	28030,90	10911,30
FBS	175	11,30	4,64	2,00	25,00	10,00	11,00
FBH	137	1,52	0,63	0,09	2,71	1,63	1,63
ZPD (Ind/L)	176	117,84	748,86	0,00	9375,00	1,30	4,77
ZPS	176	3,15	1,56	0,00	8,00	3,00	3,00
ZPH	135	0,57	0,39	0,00	1,49	0,00	0,59
ZBDv (Ind/L)	63	15109,43	66560,61	0,00	461200,00	0,00	0,00
ZBDa (Ind/m <sup>2</sup> )	143	9265,36	23044,65	0,00	240333,00	0,00	2038,20
ZBS	171	2,19	1,61	0,00	7,00	1,00	2,00
ZBH	125	0,29	0,38	0,00	1,42	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia. Cél: células; Ind: individuos; FPD: Densidad de fitoplancton; FPS: Riqueza de fitoplancton; FPH: Diversidad de fitoplancton; FBD: Densidad de fitobentos; FBS: Riqueza de fitobentos; FBH: Diversidad de fitobentos; ZPD: Densidad de zooplancton; ZPS: Riqueza de zooplancton; ZPH: Diversidad de zooplancton; ZBDv: Densidad en volumen de zoobentos; ZBDa: Densidad en área de zoobentos; ZBS: Riqueza de zoobentos; ZBH: diversidad de zoobentos

La comunidad biológica con mayor número de especies registradas por campaña de monitoreo es la fitoplanctónica (33), seguida del fitobentos (25). En tanto, zooplancton y zoobentos registran en general bajo número de *taxa* por campaña de monitoreo, alcanzando un máximo de 8 y 7 *taxa* respectivamente. El número total de *taxa* registrados por grupo biológico se analizará en detalle en el ítem correspondiente.

### 6.2.2.1. Fitobentos

La comunidad fitobentónica descrita para las lagunas La Punta y La Brava es de 178 *taxa* en total, siendo dominante el grupo de las diatomeas (Clase Bacillariophyceae) con el 89% del total registrado (159 *taxa*). El total de géneros 66, pertenecientes a 52 familias y 7 clases, siguiendo la nomenclatura taxonómica actualizada de <https://www.algaebase.org/>.

Cabe señalar que no existen categorías de conservación para las microalgas por lo que no es un criterio a considerar en este análisis. Los *taxa* encontrados en el área de influencia directa se representan en la Tabla 6-54.

Tabla 6-54 Composición taxonómica de fitobentos registrada.

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa
Bacillariophyceae	Bacillariales	Bacillariaceae	Denticula	<i>Denticula</i>
				<i>Denticula elegans</i>
				<i>Denticula kuetzingii</i>
				<i>Denticula spp</i>
				<i>Denticula subtilis</i>
				<i>Denticula thermalis</i>
				<i>Denticula valida</i>
			Hantzschia	<i>Hantzschia</i>
				<i>Hantzschia sp</i>
			Nitzschia	<i>Nitzschia brevistriata</i>
				<i>Nitzschia denticulum</i>
				<i>Nitzschia epitenoides</i>
				<i>Nitzschia frustulum</i>
				<i>Nitzschia pusilla</i>
				<i>Nitzschia spp</i>
				<i>Nitzschia</i>
				<i>Nitzschia liebetruth</i>
				<i>Nitzschia accedens var chilensis</i>
				<i>Nitzschia bacillum</i>
				<i>Nitzschia fonticola</i>
<i>Nitzschia grunowii</i>				
<i>Nitzschia ovalis</i>				
<i>Nitzschia palea</i>				
<i>Nitzschia pusilla</i>				
<i>Nitzschia spp</i>				
<i>Nitzschia valdecostata</i>				

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa
	Cocconeidales	Achnanthidiaceae	<i>Tryblionella</i>	<i>Tryblionella hungarica</i>
				<i>Tryblionella sp</i>
			<i>Achnanthidium</i>	<i>Achnanthidium</i>
				<i>Achnanthidium spp</i>
			<i>Karayevia</i>	<i>Karayevia sp</i>
			<i>Planothidium</i>	<i>Planothidium biporum</i>
				<i>Planothidium chilense</i>
				<i>Planothidium frequentissimum</i>
				<i>Planothidium lanceolatum</i>
		<i>Planothidium sp</i>		
		<i>Planothidium spp</i>		
		Cocconeidales	<i>Cocconeis</i>	<i>Cocconeis</i>
				<i>Cocconeis euglypta</i>
				<i>Cocconeis lineata</i>
				<i>Cocconeis neodiminuta</i>
				<i>Cocconeis placentula var euglypta</i>
				<i>Cocconeis sp</i>
				<i>Cocconeis spp</i>
	Cymbellales	Anomoeoneidaceae	<i>Adlafia</i>	<i>Adlafia minuscula</i>
				<i>Adlafia sp</i>
			<i>Anomoeoneis</i>	<i>Anomoeoneis</i>
			<i>Anomoeoneis sp</i>	
		Cymbellaceae	<i>Cymbella</i>	<i>Cymbella</i>
				<i>Cymbella pusilla</i>
				<i>Cymbella spp</i>
				<i>Cymbellonitzschia spp</i>
		Gomphosphaeriaceae	<i>Encyonema</i>	<i>Encyonema</i>
			<i>Gomphonema</i>	<i>Gomphonema sp</i>
	Eunotiales	Eunotiaceae	<i>Eunotia</i>	<i>Epithemia</i>
				<i>Eunotia</i>
	Fragilariales	Fragilariaceae	<i>Fragilaria</i>	<i>Fragilaria</i>
				<i>Fragilaria brevistriata</i>
				<i>Fragilaria construens f subsalina</i>
				<i>Fragilaria sp</i>
				<i>Fragilaria stuasorella</i>
			<i>Synedra</i>	<i>Synedra</i>
		Staurosiraceae	<i>Pseudostaurosira</i>	<i>Pseudostaurosira brevistriata</i>
				<i>Pseudostaurosira sp</i>
				<i>Pseudostaurosira subsalina</i>
				<i>Staurosirella pinnata</i>
	<i>Staurosirella sp</i>			
Licmophorales	Ulnariaceae	<i>Ulnaria</i>	<i>Ulnaria ulna</i>	
Mastogloiales	Achnantheaceae	<i>Achnanthes</i>	<i>Achnanthes</i>	
			<i>Achnanthes atacamae</i>	
			<i>Achnanthes brevipes</i>	
			<i>Achnanthes inflata</i>	
			<i>Achnanthes minutissima</i>	
			<i>Achnanthes sp</i>	
			<i>Achnanthes spp</i>	
			<i>Achnanthes submarina</i>	

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa				
			<i>Haloroundia</i>	<i>Achnanthes thermalis var rumrichorum</i>				
				<i>Haloroundia sp</i>				
				<i>Haloroundia speciosa</i>				
				Mastogloiaceae	<i>Mastogloia</i>	<i>Mastogloia</i>		
						<i>Mastogloia atacamae</i>		
						<i>Mastogloia braunii</i>		
						<i>Mastogloia elliptica</i>		
						<i>Mastogloia smithii</i>		
						<i>Mastogloia sp</i>		
						<i>Mastogloia spp</i>		
							Amphipleuraceae	<i>Amphipleura</i>
								<i>Amphipleura</i>
								<i>Halamphora</i>
		<i>Halamphora carvajalana</i>						
					<i>Halamphora coffeaeformis</i>			
					<i>Halamphora spp</i>			
			Brachysiraceae	<i>Brachysira</i>	<i>Brachysira aponina</i>			
					<i>Brachysira atacamae</i>			
					<i>Brachysira sp</i>			
					<i>Brachysira spp</i>			
					Naviculaceae	<i>Caloneis</i>	<i>Caloneis silicula</i>	
							Stauroneidaceae	<i>Craticula</i>
			Diploneidaceae	<i>Diploneis</i>	<i>Craticula spp</i>			
					<i>Diploneis</i>			
					<i>Diploneis chilensis</i>			
					<i>Diploneis elliptica</i>			
					<i>Diploneis smithii</i>			
			Naviculales incertae sedis	<i>Mayamaea</i>				
				<i>Microstatus</i>				
			Naviculales	<i>Navicula</i>	<i>Mayamaea atomus</i>			
					<i>Microcostatus</i>			
					<i>Navicula</i>			
					<i>Navicymbula</i>			
					<i>Navicula atacamana</i>			
					<i>Navicula brevipes</i>			
					<i>Navicula cincta</i>			
					<i>Navicula cryptotenella</i>			
<i>Navicula digitoradiata</i>								
<i>Navicula kuripanensis</i>								
<i>Navicula lauca</i>								
<i>Navicula luisii</i>								
<i>Navicula parinacota</i>								
<i>Navicula salinicola</i>								
<i>Navicula spp</i>								
<i>Navicula veneta</i>								
						Pinnulariaceae	<i>Pinnularia</i>	<i>Pinnularia</i>
	<i>Pinnularia sp</i>							
		Plagiotropidaceae	<i>Plagiotropis</i>	<i>Plagiotropis</i>				
		Proschkiniaceae	<i>Proschkinia</i>	<i>Proschkinia</i>				
				<i>Proschkinia bulnheimii</i>				

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa	
		Neidiaceae	<i>Scoliopleura</i>	<i>Scoliopleura sp</i>	
		Sellaphoraceae	<i>Fallacia</i>	<i>Fallacia diploneoides</i>	
				<i>Fallacia sp</i>	
			<i>Stauroneis</i>	<i>Stauroneis</i>	
				<i>Stauroneis sp</i>	
		<i>Saturosira</i>	<i>Stausosira spp</i>		
	Rhopalodiales	Rhopaliaceae	<i>Rhopalodia</i>	<i>Rhopalodia</i>	<i>Rhopalodia</i>
				<i>Rhopalodia constricta</i>	
				<i>Rhopalodia sp</i>	
				<i>Rhopalodia spp</i>	
				<i>Rhopalodia wetzelii</i>	
	Suriellales	Surirellaceae	<i>Campylodiscus</i>	<i>Campylodiscus</i>	
		Entomoneidaceae	<i>Entomoneis</i>	<i>Entomoneis</i>	
				<i>Entomoneis paludosa</i>	
				<i>Entomoneis sp</i>	
		Surirellaceae	<i>Surirella</i>	<i>Surirella</i>	
				<i>Surirella sella</i>	
				<i>Surirella spp</i>	
				<i>Surirella wetzelii</i>	
	Tabellariales	Tabellariaceae	<i>Diatoma</i>	<i>Diatoma</i>	
<i>Diatoma moniliformis</i>					
Thalassiosiphysales	Catenulaceae	<i>Amphora</i>	<i>Amphora</i>		
			<i>Amphora acutiusscula</i>		
			<i>Amphora atacamae</i>		
			<i>Amphora atacamana</i>		
			<i>Amphora carvajaliana</i>		
			<i>Amphora libyca</i>		
			<i>Amphora sp</i>		
			<i>Amphora spp</i>		
Chlorophyceae	Sphaeropleales	Radiococcaceae	<i>Gloeocapsa</i>	<i>Gloeocapsa spp</i>	
		Radiococcaceae	<i>Gloeocystis</i>	<i>Gloeocystis</i>	
		Hydrodictyceae	<i>Pediastrum</i>	<i>Pediastrum</i>	
		Schroederiaceae	<i>Schroederia</i>	<i>Schroederia sp</i>	
	Chlamydomonadales	Sphaerocystidaceae	<i>Sphaerocystis</i>	<i>Sphaerocystis</i>	
Coccinodiscophyceae	Coccinodiscales	Cocconeidales	<i>Coccinodiscus</i>	<i>Coccinodiscophyceae (Subclase)</i>	
	Melosirales	Melosiraceae	<i>Melosira</i>	<i>Melosira</i>	
Cyanophyceae	Chroococcales	Chroococcaceae	<i>Chroococcus</i>	<i>Chroococcus</i>	
		Gomphosphaeriaceae	<i>Gomphosphaeria</i>	<i>Gomphosphaeria</i>	
	Nostocales	Nostocaceae	<i>Anabaena</i>	<i>Anabaena sp</i>	
		Gloeotrichiaceae	<i>Gloeotrichia</i>	<i>Gloeotrichia</i>	
		Aphanizomenonaceae	<i>Nodularia</i>	<i>Nodularia</i>	
		Nostocaceae	<i>Nostoc</i>	<i>Nostoc</i>	
	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	<i>Lyngbya</i>	<i>Lyngbya</i>	
		Oscillatoriales	<i>Oscillatoria</i>	<i>Oscillatoria</i>	
	Synechococcales	Merismopediaceae	<i>Aphanocapsa</i>	<i>Aphanocapsa</i>	
		Merismopediaceae	<i>Merismopedia</i>	<i>Merismopedia</i>	
Pseudoanabaenaceae		<i>Pseudanabaena</i>	<i>Pseudanabaena</i>		
Dinophyceae	Peridinales	Peridiniaceae	<i>Peridinium</i>	<i>Peridinium</i>	
Mediophyceae	Stephanodiscales	Stephanodiscaceae	<i>Cyclotella</i>	<i>Cyclotella spp</i>	
N/A	N/A	N/A	N/A	<i>Pennada indet</i>	

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa
Zygnematophyceae	Desmidiiales	Closteriaceae	<i>Closterium</i>	<i>Closterium</i>
		Desmidiaceae	<i>Cosmarium</i>	<i>Cosmarium sp</i>

Fuente: Elaboración propia.

Al agrupar los datos espacialmente por laguna (Tabla 6-51), se observa que Laguna La Brava registra los mínimos de densidad (0,4 cél/mm<sup>2</sup>) y el mínimo de diversidad (0,09 índice de Shannon). Por otro parte, los valores máximos de todos los parámetros también se registran en Laguna La Brava.

Los promedios (o mediana en el caso que no se cumplan los requerimientos de análisis paramétricos) por laguna para cada parámetro fueron sometidos a los test estadísticos correspondientes, obteniéndose finalmente que existen diferencias significativas entre las lagunas La Punta y La Brava para los parámetros de Riqueza (LB < LP; MWtest p-valor < 0,05) y Diversidad (LB < LP; MWtest p-valor < 0,05). En tanto las densidades de fitobentos no presentan diferencia significativa entre ambas lagunas (MWtest p-valor > 0,05).

Tabla 6-55 Estadígrafos de fitobentos por laguna

	FBD (cél/mm <sup>2</sup> )		FBS		FBH	
	La Brava	La Punta	La Brava	La Punta	La Brava	La Punta
N observaciones	103	72	103	72	81	56
Promedio	119.486,26	30.325,56	11,01	11,71	1,37	1,75
SD	288.066,11	68.157,11	4,62	4,66	0,63	0,56
Mínima	0,40	0,59	2,00	2,00	0,09	0,26
Máxima	2.347.919,00	474.618,40	25,00	22,00	2,71	2,58
MWTest (p-valor)	0,153494519		0,038798591		0,006432131	
Dif.sig.	No		Sí		Sí	

Fuente: Elaboración propia. Dif.sig: diferencia significativa; FBD: densidad de fitobentos; FBS: riqueza de fitobentos; FBH: diversidad de fitobentos

## I. Densidad

Los géneros de fitobentos con mayores densidades para ambas lagunas son *Denticula*, *Mastogloia* y *Navicula*.

Ambas lagunas fueron evaluadas a una resolución temporal estacional (Figura 6-118), indicando la dispersión de los datos de  $1\sigma$  (1 unidad de desviación estándar) y mostrando los valores mínimos y máximos por período.

Analizando el conjunto de datos a una resolución temporal estacional para ambas lagunas se destacan los veranos 2015, 2016 y 2017 de La Brava. La tendencia de ambos ajustes lineales (regresión lineal de mínimos cuadrados) es ligeramente negativa, con pendientes en LP de  $-970,4 \text{ cél/mm}^2/\text{año}$  y en LB de  $-9210,2 \text{ cél/mm}^2/\text{año}$ , con un  $r^2$  inferior al 10% y un p-valor (Wtest) no significativo. En conjunto, esto significa que no hay evidencia de un aumento o disminución lineal con respaldo estadístico.

En tanto, al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-119), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=9, LB03 n=13 y LB01 n=9) entrega un p-valor  $> 0,05$ , indicando que no existen diferencias significativas para la densidad del fitobentos entre puntos de muestreo.

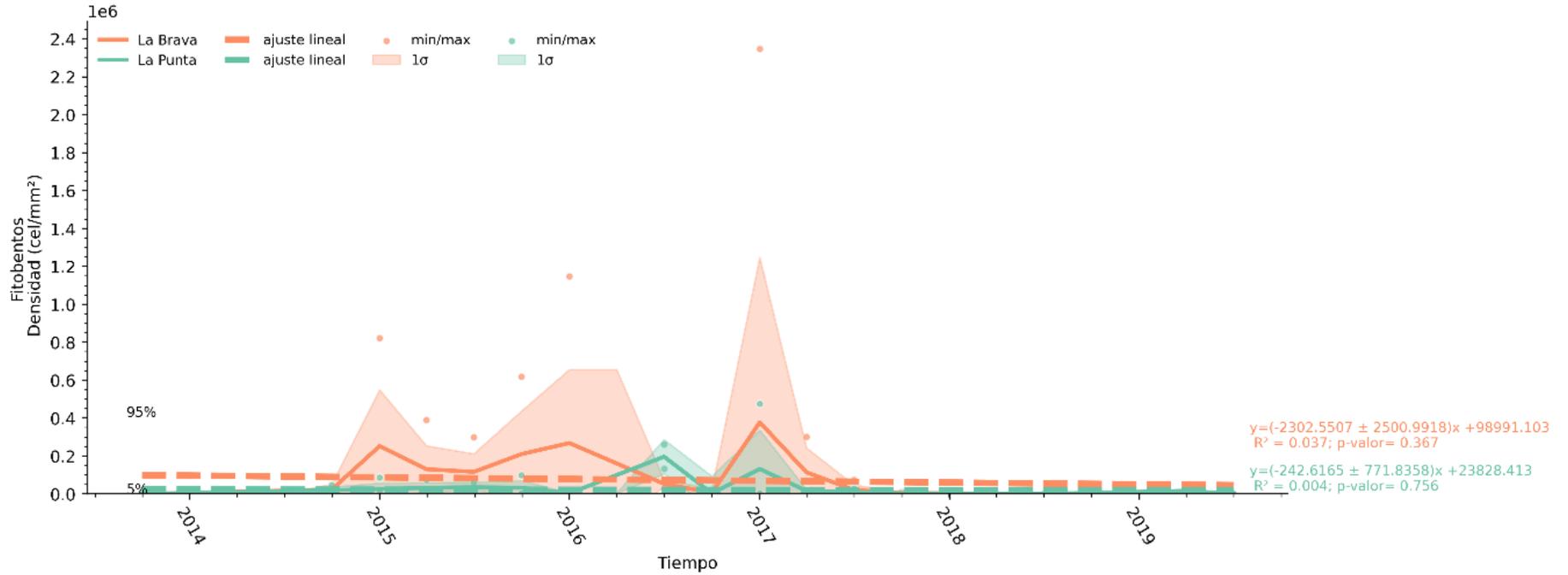


Figura 6-118 Densidad de fitobentos en La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.



Figura 6-119 Análisis temporal y espacial de densidad fitobentos de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

## II. Riqueza

El número de entidades taxonómicas o riqueza (S) fue analizada para ambas lagunas a una resolución temporal estacional (Figura 6-120), indicando la dispersión de los datos de  $1 \sigma$  y mostrando los valores mínimos y máximos por período.

Para el análisis de series temporales, al aplicar un ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a las series se obtuvieron coeficientes de determinación inferior a 0,10 y un p-valor no significativo. Debido a esto, no se puede afirmar una tendencia de aumento o disminución con respaldo estadístico. (La Punta pendiente = +0,3628 *taxa/año*;  $r^2=0,129$ ; Wtest p-valor > 0,05; La Brava pendiente = -0,0216 *taxa/año*;  $r^2=0,000$ ; Wtest p-valor > 0,05)

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-121), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=9, LB03 n=13 y LB01 n=9) entrega un p-valor > 0,05, indicando que no existen diferencias significativas para la riqueza del fitobentos entre puntos de muestreo.

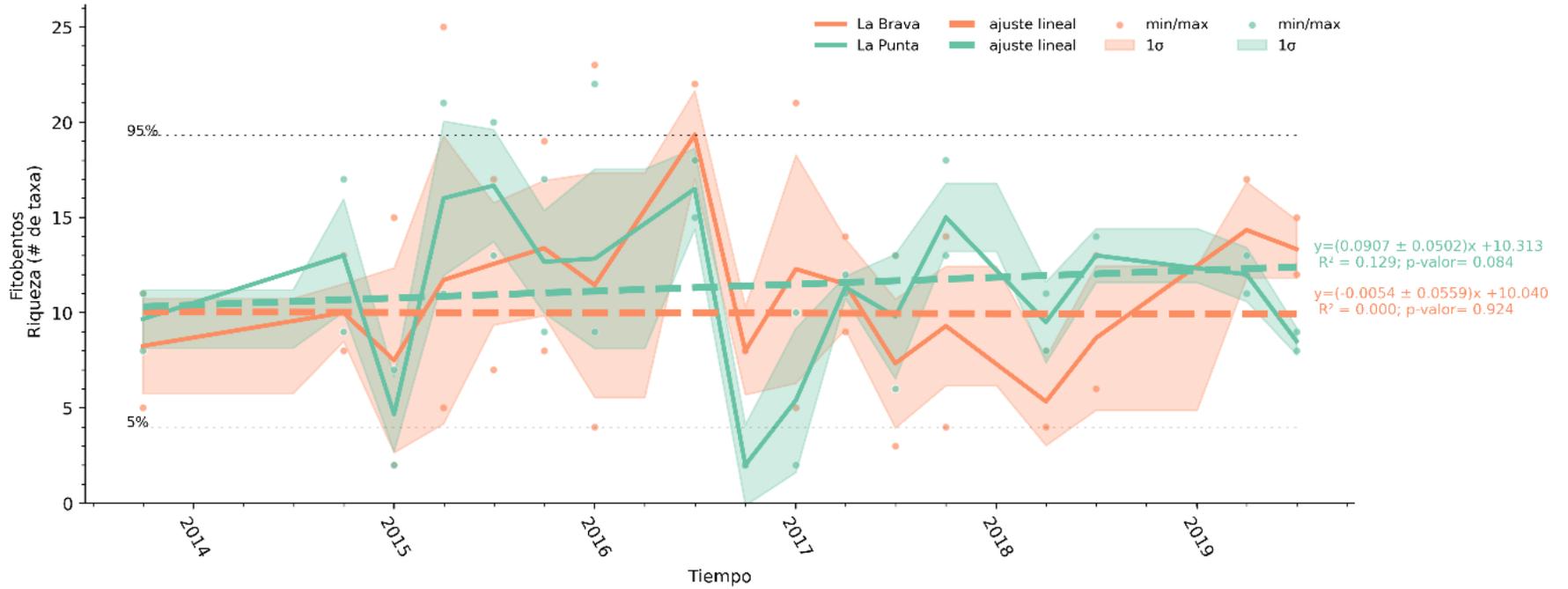


Figura 6-120 Riqueza de fitobentos en La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

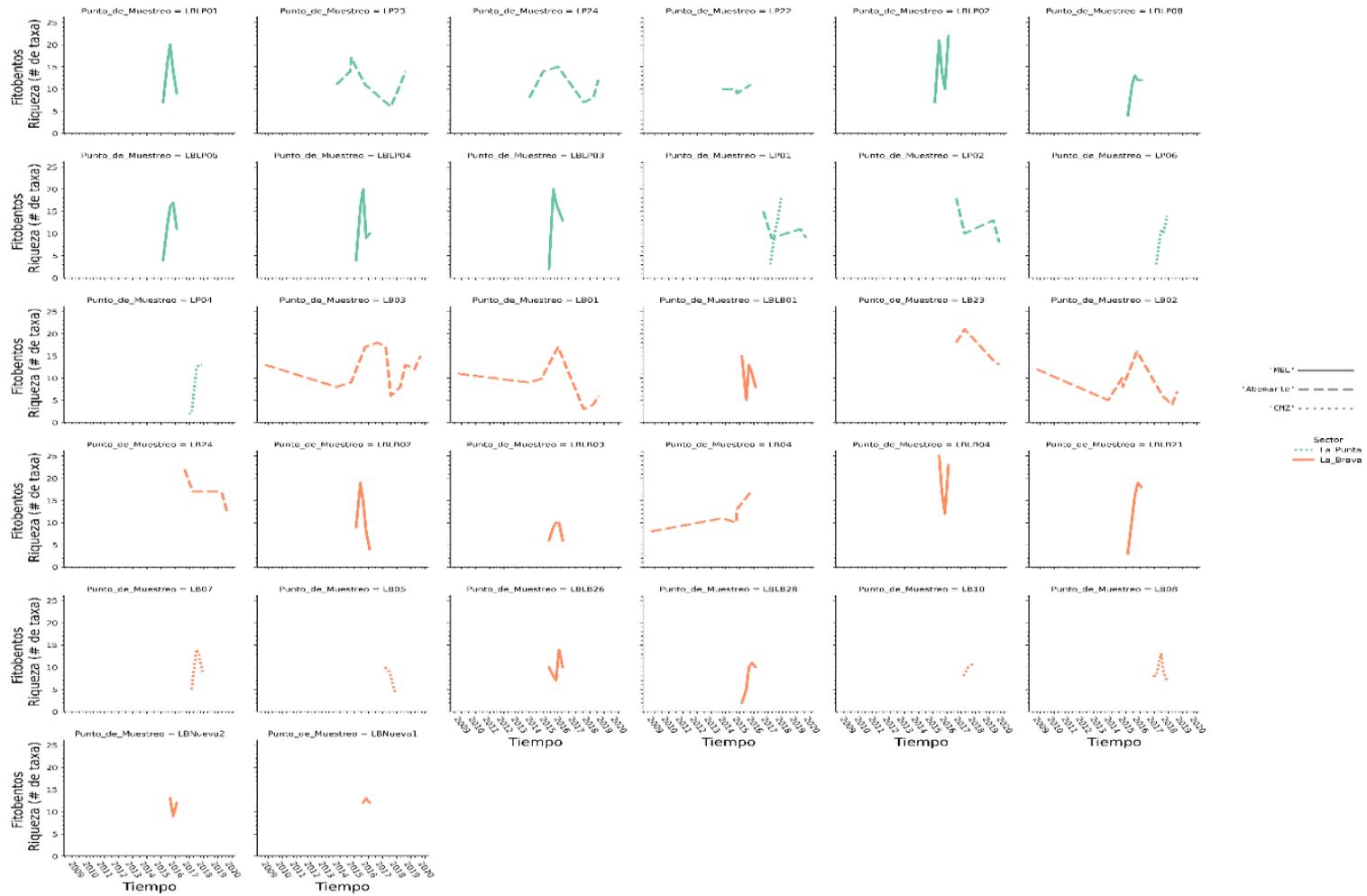


Figura 6-121 Análisis temporal y espacial de riqueza de fitobentos de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

### III. Diversidad

Los valores de diversidad promedio (índice de Shannon) presentan comportamiento similar tanto en La Brava como en La Punta. En La Brava se observa el valor promedio máximo de diversidad en verano 2015, en el punto de muestreo LB-4 con 2,71 reportado por Albemarle. Por su parte, el valor promedio mínimo en La Brava se observa en invierno 2016, reportado por Albemarle en el punto de muestreo LB-24 con 0,64.

En el caso de La Punta, el valor promedio máximo se observa en verano 2015, en el punto de muestreo LP-24 con 2,53 reportado por Albemarle. A su vez, el valor promedio mínimo de diversidad en La Punta se observa en invierno 2016, reportado por Albemarle en el punto de muestreo LP-01 con 0,29.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie del sistema lagunar de La Brava presenta tendencias de disminución significativa de índice de diversidad, con una pendiente de 0,0412 unidades/año ( $r^2=0,294$ ; Wtest p-valor < 0,05). En tanto, para la serie de La Punta se obtiene un coeficiente de determinación menor a 0,10.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-123), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=8, LB03 n=12 y LB01 n=8) entrega un p-valor > 0,05, indicando que no existen diferencias significativas para la diversidad del fitobentos entre puntos de muestreo.

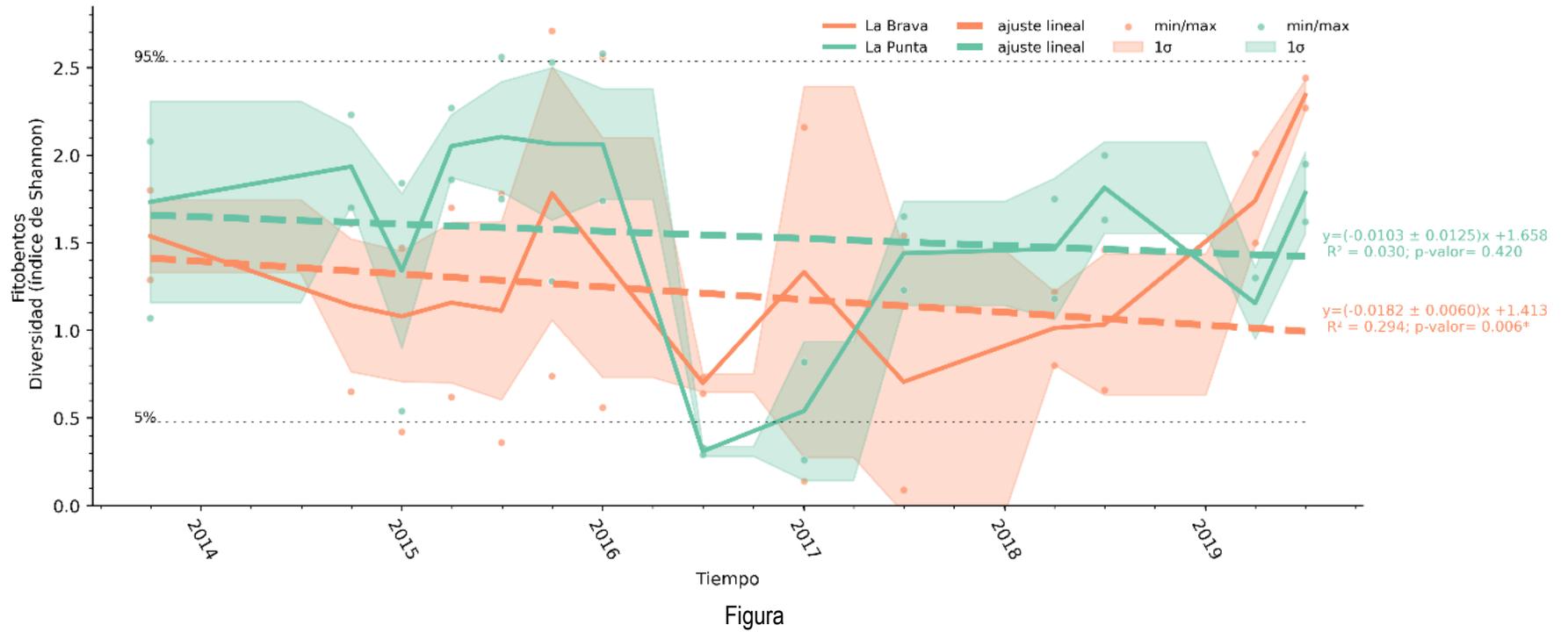


Figura 6-122 Diversidad de fitobentos en La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

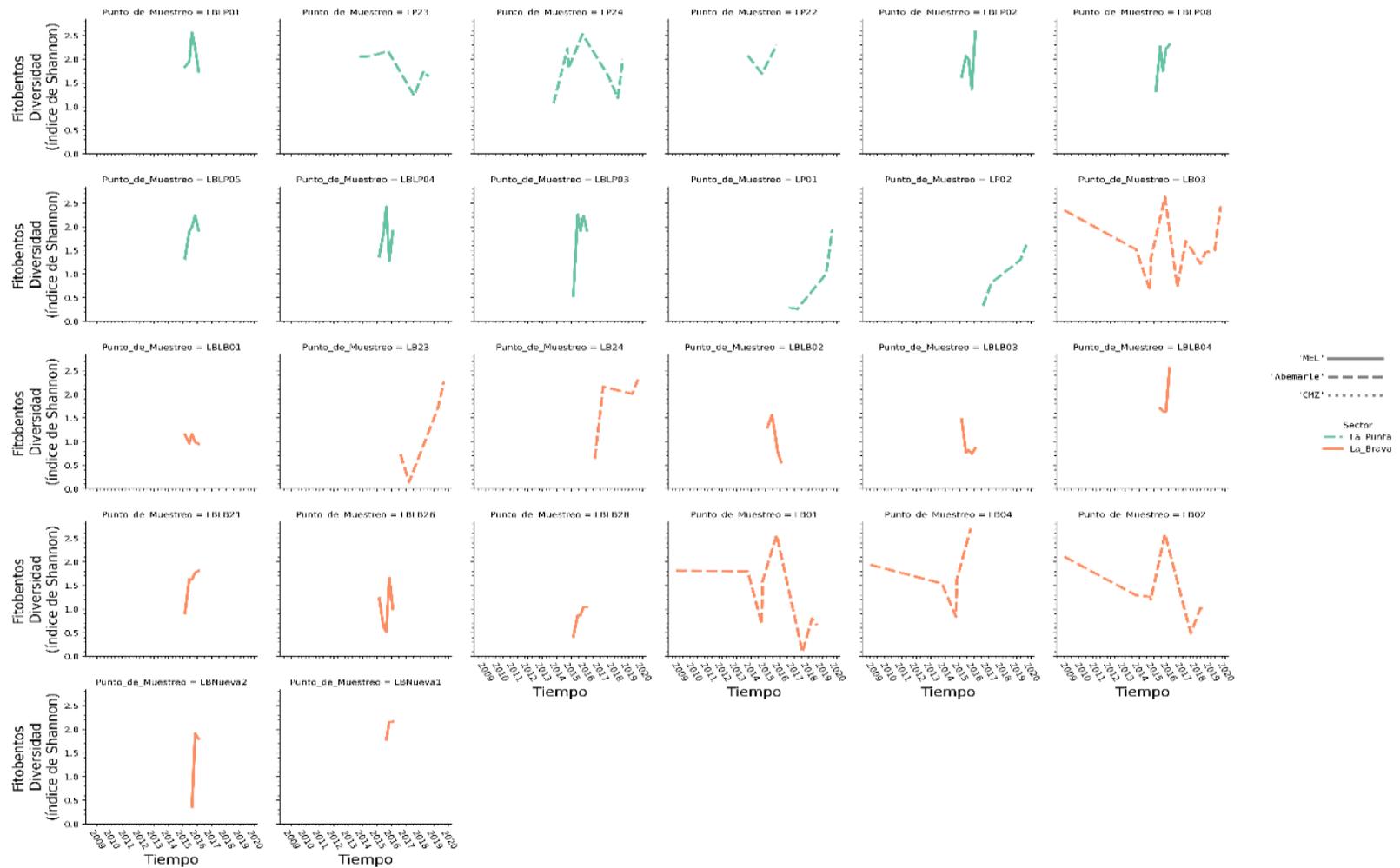


Figura 6-123 Análisis temporal y espacial de diversidad de fitobentos de las Lagunas La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.2.2. Fitoplancton

No existen categorías de conservación para las microalgas planctónicas por lo que no es un criterio a considerar en este análisis. Los *taxa* encontrados en el área de influencia directa se representan en la Tabla 6-56.

Tabla 6-56 Composición taxonómica de Fitoplancton registrada.

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa
Bacillariophyceae	Bacillariales	Bacillariaceae	<i>Denticula</i>	<i>Denticula</i>
				<i>Denticula elegans</i>
				<i>Denticula kuetzingii</i>
				<i>Denticula spp</i>
				<i>Denticula subtilis</i>
				<i>Denticula thermalis</i>
				<i>Denticula valida</i>
			<i>Hantzschia</i>	<i>Hantzschia</i>
			<i>Nitzschia</i>	<i>Nitzschia accedens</i>
				<i>Nitzschia epitenoides</i>
				<i>Nitzschia liebetruithii</i>
				<i>Nitzschia pusilla</i>
				<i>Nitzschia valdecostata</i>
				<i>Aff Nitzschia</i>
				<i>Nitzschia</i>
				<i>Nitzschia bacillum</i>
				<i>Nitzschia compressa</i>
				<i>Nitzschia epithemoides</i>
				<i>Nitzschia fonticola</i>
				<i>Nitzschia grunowii</i>
				<i>Nitzschia inconspicua</i>
	<i>Nitzschia lacunarum</i>			
	<i>Nitzschia liebetruithii</i>			
	<i>Nitzschia ovalis</i>			
	<i>Nitzschia pusilla</i>			
	<i>Nitzschia sp</i>			
	<i>Nitzschia spp</i>			
	<i>Nitzschia valdecostata</i>			
	<i>Tryblionella</i>	<i>Tryblionella compressa</i>		
		<i>Tryblionella hungarica</i>		
	Cocconeidales	Achnanthidiaceae	<i>Achnanthidium</i>	<i>Achnanthidium exiguum</i>
				<i>Achnanthidium minutissimum</i>
				<i>Achnanthidium saprophilum</i>
<i>Achnanthidium</i>				
<i>Karayevia</i>			<i>Karayevia</i>	
			<i>Karayevia sp</i>	
<i>Planothidium</i>			<i>Planothidium biporumum</i>	
			<i>Planothidium chilense</i>	
			<i>Planothidium lanceolatum</i>	

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa
				<i>Planothidium</i> sp
		Cocconeidales	<i>Cocconeis</i>	<i>Cocconeis</i>
				<i>Cocconeis euglypta</i>
				<i>Cocconeis lineata</i>
				<i>Cocconeis neodiminuta</i>
				<i>Cocconeis placentula</i> var <i>euglypta</i>
				<i>Cocconeis</i> spp
	Cymbellales			Anomoeoneidaceae
		<i>Anomoeoneis</i>	<i>Anomoeoneis</i>	
		Cymbellaceae	<i>Cymbella</i>	<i>Cymbella pusilla</i>
				<i>Cymbella</i> spp
				<i>Cymbellonitzschia</i> sp
		Gomphonemataceae	<i>Encyonopsis</i>	<i>Encyonopsis microcephala</i>
	Rhoicospheniaceae	<i>Rhoicosphenia</i>	<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>	
	Eunotiales	Eunotiaceae	<i>Eunotia</i>	<i>Eunotia</i>
	Fragilariales	Fragilariaceae	<i>Fragilaria</i>	<i>Fragilaria</i>
				<i>Fragilaria bicapitata</i>
				<i>Fragilaria brevistriata</i>
				<i>Fragilaria capucina</i>
				<i>Fragilaria construens</i> f <i>subsalina</i>
				<i>Fragilaria pinnata</i>
				<i>Fragilaria</i> spp
		<i>Fragilaria stuasorella</i>		
		<i>Frankophila</i>	<i>Frankophila similioides</i>	
		<i>Synedra</i>	<i>Synedra</i>	
	Staurosiraceae	<i>Pseudostaurosira</i>	<i>Pseudostaurosira brevistriata</i>	
			<i>Pseudostaurosira elliptica</i>	
			<i>Pseudostaurosira</i> sp	
			<i>Pseudostaurosira subsalina</i>	
		<i>Staurosirella</i>	<i>Staurosirella pinnata</i>	
			<i>Staurosirella</i> spp	
	Licmophorales	Ulnariaceae	<i>Tabularia</i>	<i>Tabularia fasciculata</i>
	Mastogloiales	Achnantheaceae	<i>Achnanthes</i>	<i>Achnanthes</i>
				<i>Achnanthes brevipes</i>
				<i>Achnanthes modestiformis</i>
				<i>Achnanthes</i>
				<i>Achnanthes submarina</i>
		<i>Haloroundia</i>	<i>Haloroundia</i> sp	
			<i>Haloroundia speciosa</i>	
		<i>Platessa</i>	<i>Platessa</i> sp	
		Mastogloiaceae	<i>Mastogloia</i>	<i>Mastogloia</i>
	<i>Mastogloia atacamae</i>			
	<i>Mastogloia braunii</i>			
	<i>Mastogloia elliptica</i>			
	<i>Mastogloia smithii</i>			
		<i>Mastogloia</i> sp		

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa		
				<i>Mastogloia spp</i>		
	N/A	N/A	N/A	<i>Pennada indet</i>		
	Naviculales	Amphipleuraceae	<i>Amphipleura</i>	<i>Amphipleura</i>		
			<i>Halamphora</i>	<i>Halamphora acutiuscula</i>	<i>Halamphora atacamae</i>	
				<i>Halamphora carvajaliana</i>	<i>Halamphora coffeaeformis</i>	
				<i>Halamphora spp</i>		
				Brachysiraceae	<i>Brachysira</i>	<i>Brachysira aponina</i>
						<i>Brachysira atacamae</i>
			<i>Brachysira sp</i>			
		Stauroneidaceae	<i>Craticula</i>	<i>Craticula cuspidata</i>		
				<i>Craticula sp</i>		
				<i>Craticula spp</i>		
		Diploneidaceae	<i>Diploneis</i>	<i>Diploneis smithii</i>		
				<i>Diploneis smithii var dilatata</i>		
				<i>Diploneis sp</i>		
				<i>Diploneis spp</i>		
		Sellaphoraceae	<i>Fallacia</i>	<i>Fallacia sp</i>		
		Diadesmidaceae	<i>Luticola</i>	<i>Luticola sp</i>		
		Naviculales incertae sedis	<i>Mayamaea</i>	<i>Mayamaea atomus</i>		
			<i>Navicymbulla</i>	<i>Navicymbulla</i>		
		<i>Navicula</i>	<i>Navicula</i>	<i>Navicula</i>		
				<i>Navicula carvajaliana</i>		
				<i>Navicula cincta</i>		
				<i>Navicula cryptotenella</i>		
				<i>Navicula kuripanensis</i>		
				<i>Navicula luisii</i>		
				<i>Navicula parinacota</i>		
				<i>Navicula radiosa</i>		
				<i>Navicula salinicola</i>		
	<i>Navicula sp</i>					
	<i>Navicula spp</i>					
	<i>Navicula tripunctata</i>					
	Pinnulariaceae			<i>Pinnularia</i>	<i>Pinnularia</i>	
					<i>Pinnularia spp</i>	
		<i>Pinnularia vidris</i>				
	Proschkiniaceae	<i>Proschkinia</i>	<i>Proschkinia</i>			
			<i>Proschkinia bulnheimii</i>			
	Neidiaceae	<i>Scoliopleura</i>	<i>Scoliopleura</i>			
	Sellaphoraceae	<i>Sellaphora</i>	<i>Sellaphora laevissima</i>			
		<i>Stauroneis</i>	<i>Stauroneis</i>			
			<i>Stauroneis atacamae</i>			
			<i>Stauroneis sp</i>			
	Rhopalodiales	Rhopaliaceae	<i>Epithemia</i>			
			<i>Epithemia adnata</i>			
			<i>Rhopalodia</i>			
			<i>Rhopalodia acuminata</i>			

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa		
				<i>Rhopalodia constricta</i>		
				<i>Rhopalodia spp</i>		
				<i>Rhopalodia wetzelii</i>		
	Surirellales		Entomoneidaceae	<i>Entomoneis</i>	<i>Entomoneis</i>	
					<i>Entomoneis paludosa</i>	
					<i>Entomoneis sp</i>	
			Surirellaceae	Campylodiscus		<i>Campylodiscus</i>
						<i>Campylodiscus sp</i>
				Surirella		<i>Surirella</i>
						<i>Surirella sella</i>
	<i>Surirella sp</i>					
	<i>Surirella spp</i>					
	Tabellariales		Tabellariaceae	<i>Diatoma</i>	<i>Diatoma</i>	
					<i>Diatoma moniliformis</i>	
				Tabellaria		<i>Diatoma sp</i>
<i>Tabellaria</i>						
Thalassiophysales		Catenulaceae	<i>Amphora</i>	<i>Amphora</i>		
				<i>Amphora atacamae</i>		
				<i>Amphora atacamana</i>		
				<i>Amphora carvajaliana</i>		
				<i>Amphora sp</i>		
Chlorophyceae	Chlamydomonadales	Chlorococcaceae	<i>Chlorococcum</i>	<i>Chlorococcum</i>		
		Dunaliellaceae	<i>Dunaliella</i>	<i>Dunaliella cf salina</i>		
		Sphaerocystidaceae	<i>Sphaerocystis</i>	<i>Sphaerocystis</i>		
	Oedogoniales	Oedogoniaceae	<i>Oedogonium</i>	<i>Oedogonium sp</i>		
	Sphaeropleales	Scenedesmaceae	<i>Coelastrum</i>	<i>Coelastrum sp</i>		
		Radiococcaceae	<i>Gloeocystis</i>	<i>Gloeocystis</i>		
			<i>Gloeocapsa</i>	<i>Gloeocapsa</i>		
Volvocales	Chlamydomonadaceae	<i>Chlamydomonas</i>	<i>Chlamydomonas</i>			
Cocinodiscophyceae	Melosirales	Melosiraceae	<i>Melosira</i>	<i>Melosira</i>		
Cyanophyceae	Chroococcales	Microcystaceae	<i>Anacystis</i>	<i>Anacystis sp</i>		
		Chroococcaceae	<i>Chroococcus</i>	<i>Chroococcus</i>		
				<i>Chroococcus sp</i>		
		Gomphosphaeriaceae	<i>Gomphosphaeria</i>	<i>Gomphosphaeria sp</i>		
	Microcystaceae	<i>Microcystis</i>	<i>Microcystis</i>			
	Nostocales	Nostocaceae	<i>Anabaena</i>	<i>Aff Anabaena</i>		
				<i>Anabaena sp</i>		
			<i>Nostoc</i>	<i>Nostoc sp</i>		
	Oscillatoriales	Oscillatoriales	<i>Oscillatoria</i>	<i>Oscillatoria</i>		
				<i>Oscillatoria sp</i>		
				<i>Oscillatoria spp</i>		
	Spirulinales	Spirulinaceae	<i>Spirulina</i>	<i>Spirulina sp</i>		
Synechococcales	Merismopediaceae	<i>Merismopedia</i>	<i>Merismopedia glauca</i>			
			<i>Merismopedia sp</i>			
Thalassiophysales	Catenulaceae	<i>Amphora</i>	<i>Amphora spp</i>			
Dinophyceae	Gonyaulacales	Ceratiaceae	<i>Ceratium</i>	<i>Ceratium hirundinella</i>		
Mediophyceae	Stephanodiscales	Stephanodiscaceae	<i>Cyclotella</i>	<i>Cyclotella ocellata</i>		
				<i>Cyclotella spp</i>		

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa
Zygnematophycidae	Desmidiiales	Closteriaceae	<i>Closterium</i>	<i>Closterium</i>
	Zygnematales	Zygnemataceae	<i>Mougeotia</i>	<i>Mougeotia sp</i>
			<i>Spirogyra</i>	<i>Spirogyra sp</i>

Fuente: Elaboración propia.

En total se recopilieron resultados de 16 campañas de muestreo, realizadas tanto por Albemarle Corporation (12 campañas de muestreo efectivas) y Minera Escondida Ltda (5 campañas de muestreo efectivas). La distribución de las campañas y sus resultados asociados a densidad (cél/mL), riqueza y diversidad se observan a continuación.

Tabla 6-57 Estadígrafos de fitoplancton por laguna

	FPD (cél/mL)		FPS		FPH	
	La Brava	La Punta	La Brava	La Punta	La Brava	La Punta
N observaciones	104	72	104	72	81	56
Promedio	592,518	433,788	9,663	9,750	1,433	1,585
SD	1843,758	1670,543	5,915	6,058	0,615	0,652
Mínima	0,000	0,071	0,000	2,000	0,000	0,335
Máxima	10110,380	9992,650	30,000	33,000	2,590	2,800
MWTest (p-valor)	0,292225113		0,438466764		0,414200206	
Dif.sig.	No		No		No	

Fuente: Elaboración propia; Dif.sig.: diferencia significativa; FPD: Densidad fitoplancton; FPS: Riqueza fitoplancton; FPH: Diversidad fitoplancton

## I. Densidad

La densidad fitoplanctónica registrada tanto en La Brava como en La Punta presenta rangos similares, observando en primera instancia un máximo en la densidad en verano 2015 para ambas lagunas y de ambas fuentes de información, presentando una densidad promedio de 8352,13 cél/mL. En La Brava se registró la mayor densidad en el punto de monitoreo LB-01 con 10110,38 cél/mL por Albarmarle y en el punto LBLB-21 con 321,90 cél/mL por Minera Escondida. En La Punta, la densidad máxima se encuentra registrada también en verano 2015, específicamente en el punto de muestreo LP-23 con 9992,65 cél/mL por Albarmarle, mientras que para Minera Escondida se registró el valor máximo en el punto de muestreo LBLP-08 con 321,90 cél/mL.

Los registros de menor densidad de fitoplanctónica para ambas lagunas se observan en la campaña de invierno 2019. En La Brava, esta baja densidad se registra en el punto de monitoreo LB-24 con 0,45 cél/mL por Albarmarle. Cabe señalar que Minera Escondida no obtuvo datos de parámetros biológicos en invierno 2019 ya que el proyecto Monturaqui a la fecha se encuentra en evaluación. Cabe señalar que las especies fitoplanctónicas más representativas de ambas lagunas son *Pseudostaurosira brevistriata*, *Denticula subtilis*, *Brachysira atacamae*, *Amphora carvajaliana* y *Fragilaria brevistriata*. Los resultados de cada punto de monitoreo se encuentran en el Anexo I.

Ambas lagunas fueron evaluadas a una resolución temporal estacional (Figura 6-124), indicando la dispersión de los datos de  $1\sigma$  y mostrando los valores mínimos y máximos por período. Para el análisis de series temporales, al aplicar un ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a las series se obtuvieron coeficientes de determinación inferior a 0,10 y un p-valor no significativo. Debido a esto, no se puede afirmar una tendencia de aumento o disminución con respaldo estadístico.

En tanto, al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-125), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=9, LB03 n=13 y LB01 n=9) entrega un p-valor  $> 0,05$ , indicando que no existen diferencias significativas para la densidad del fitoplancton entre puntos de muestreo.

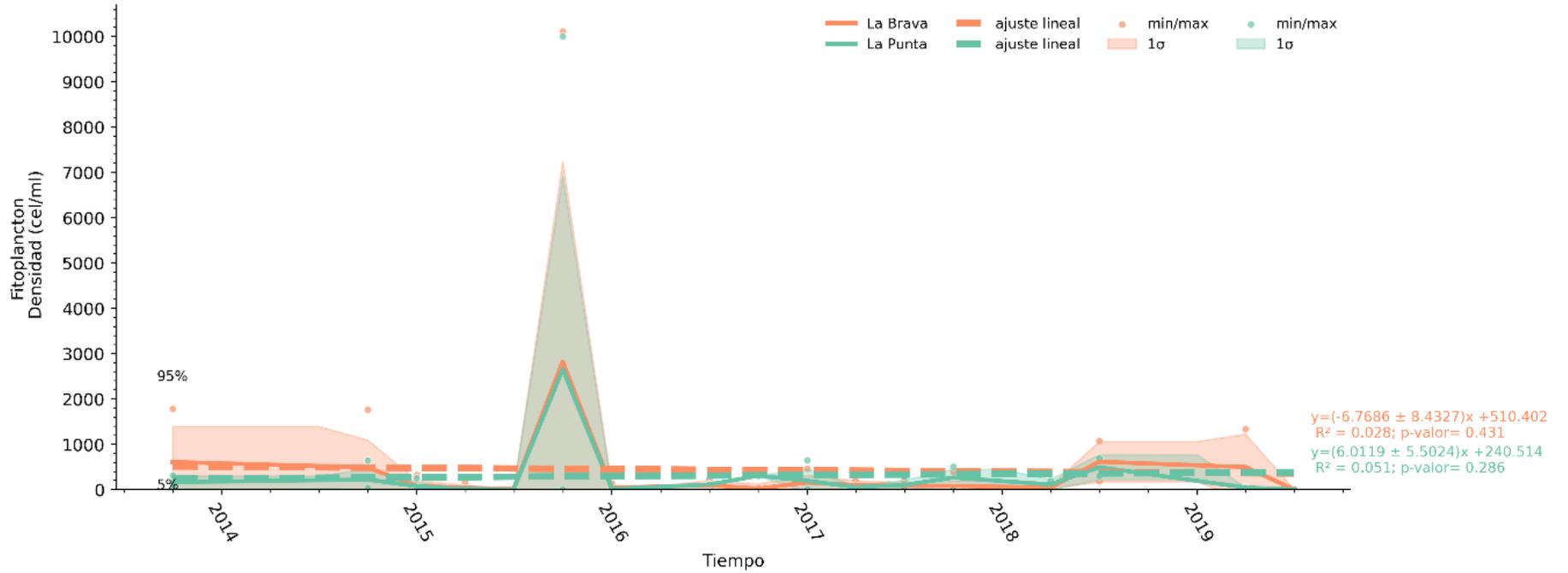


Figura 6-124 Densidad de fitoplancton en La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

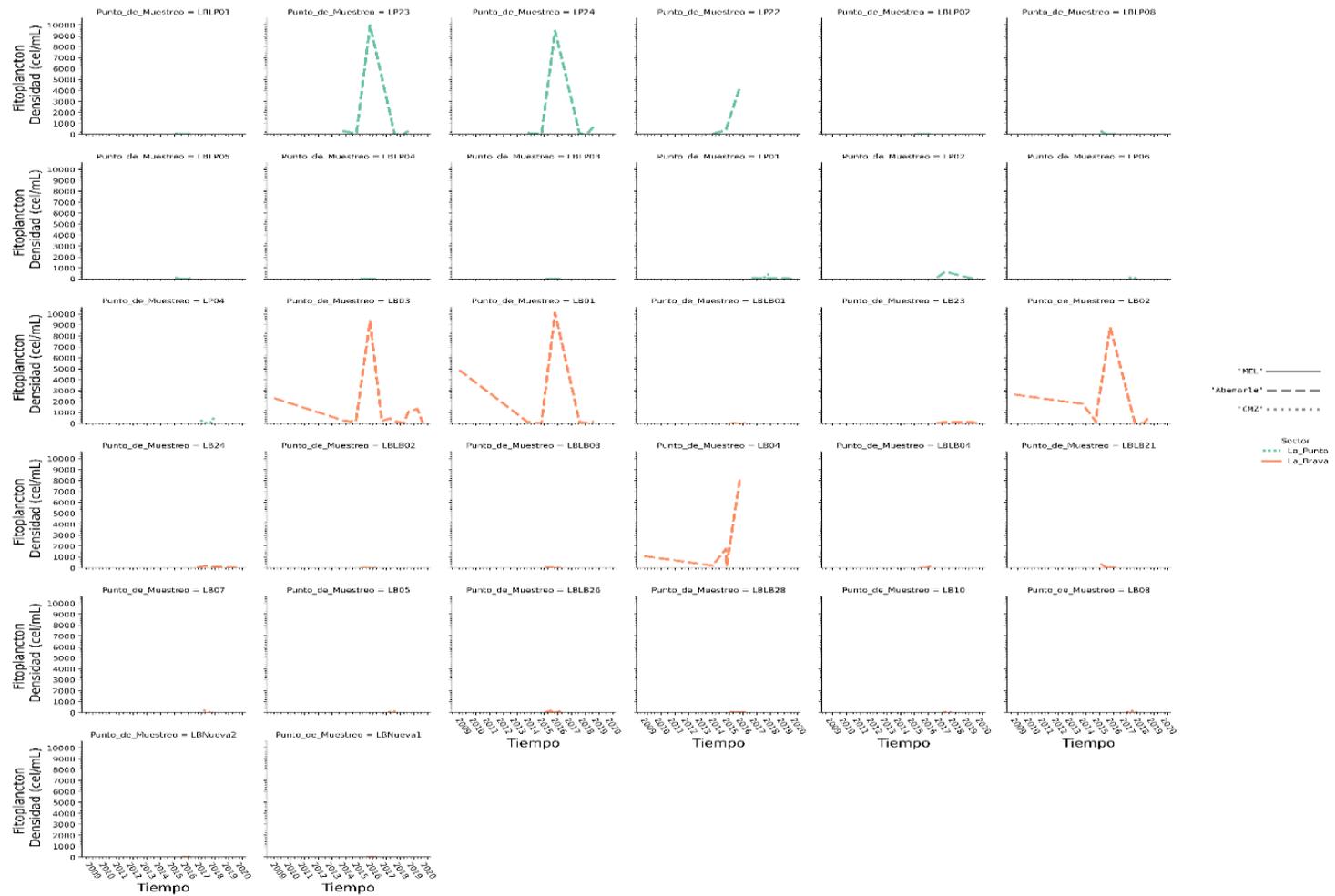


Figura 6-125 Análisis temporal y espacial de densidad de fitoplancton de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

## II. Riqueza

Ambas lagunas presentan comportamiento similar en valores de riqueza registrada, observando el mayor valor promedio en otoño 2015 con 19 *taxa*. En La Brava el valor más alto de riqueza se registra en LBLB-01 y LBLB-21 con 23 *taxa* registrada para ambos puntos de muestreo de Minera Escondida. Por otra parte, los valores mínimos observados se encuentran en verano 2018, específicamente en el punto de muestreo LB-2 por Albemarle.

Por otra parte, en La Punta se registra el valor máximo de riqueza en otoño de 2015. El punto de muestreo con el mayor registro es LBLP-02 con 33 *taxa* por Albemarle. Mientras que el valor mínimo se observa en invierno 2019 en el punto de muestreo LP-2 con 4 *taxa* por Albemarle. Cabe señalar que los datos de riqueza de cada punto de monitoreo se encuentran en el Anexo I.

Ambas lagunas fueron evaluadas a una resolución temporal estacional (Figura 6-126), indicando la dispersión de los datos de  $1\sigma$  y mostrando los valores mínimos y máximos por período. Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series de tiempo (2014 a 2019) presentan tendencias de disminución significativa de riqueza, donde se obtiene que la disminución observada tiene una pendiente en La Punta de  $-1.47 \text{ taxa/año}$  ( $r^2=0,5743$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ) y en La Brava una pendiente de  $-0,80 \text{ taxa/año}$  ( $r^2=0,291$ ; Wtest p-valor  $< 0,005$ ).

En tanto, al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-127), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=9, LB03 n=13 y LB01 n=9) entrega un p-valor  $> 0,05$ , indicando que no existen diferencias significativas para la riqueza de fitoplancton entre puntos de muestreo.

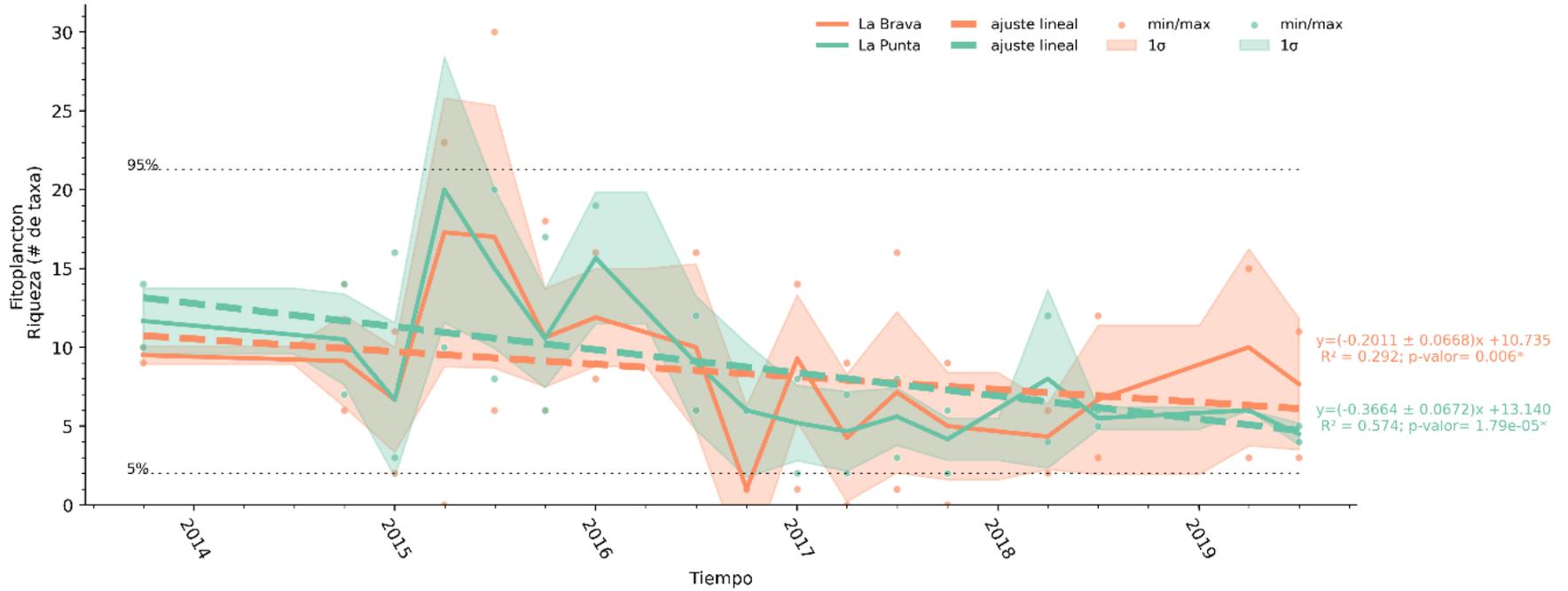


Figura 6-126 Riqueza de fitoplancton en La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

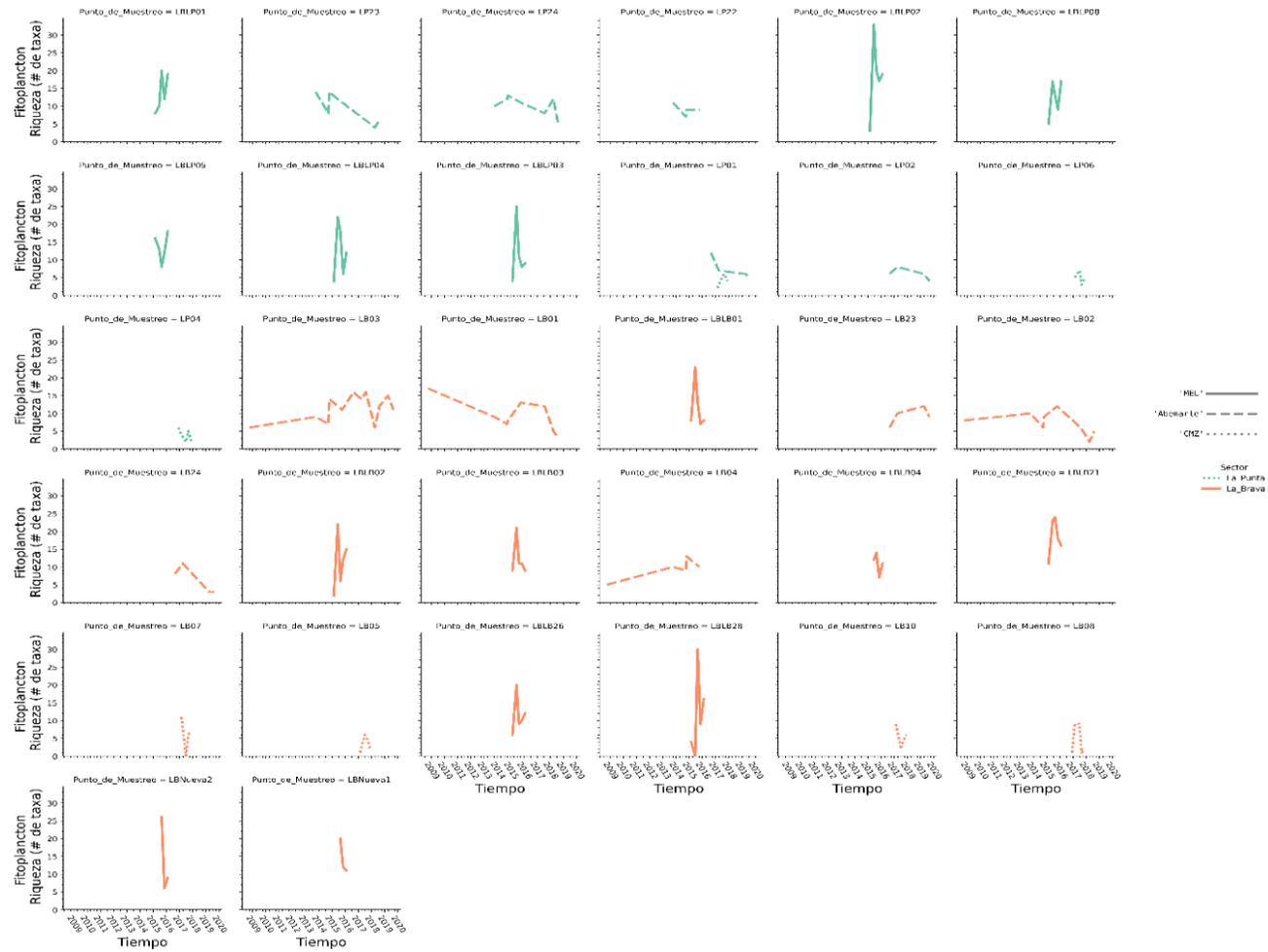


Figura 6-127 Análisis temporal y espacial de riqueza de fitoplancton de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

### III. Diversidad

En la Figura 6-128 se observa comportamiento distinto de la diversidad (índice de Shannon) entre lagunas, contando con los mayores registros para ambas lagunas en verano 2015 con un promedio de 1,16. En Laguna La Brava se observa el mayor registro en verano 2015, específicamente en el punto de monitoreo LB-02 con 2,23 por Albemarle. El valor mínimo de diversidad se encuentra registrado en la campaña invierno 2017, en el punto de monitoreo LB-02 con 0,33 por Albemarle.

En Laguna La Punta, se observa el mayor registro de diversidad en otoño 2015, en el punto de muestreo LBLP-02 con 2,7 por MEL. Mientras que los valores menores se observan en invierno 2016, específicamente para el punto de muestreo LP-02 con 0,33 por Albemarle. Cabe destacar que los valores de cada punto de muestreo se encuentran en el Anexo I.

Ambas lagunas fueron evaluadas a una resolución temporal estacional (Figura 6-128), indicando la dispersión de los datos de  $1\sigma$  y mostrando los valores mínimos y máximos por período. Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series de tiempo (2014 a 2019) presentan tendencias de disminución significativa de diversidad, donde se obtiene que la disminución observada tiene una pendiente en La Punta de  $-0,217$  unidades/año ( $r^2=0,667$ ; Wtest p-valor  $< 0,001$ ) y en La Brava una pendiente de  $-0,101$  unidades/año ( $r^2=0,330$ ; Wtest p-valor  $< 0,05$ ).

En tanto, al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-129), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=8, LB03 n=12 y LB01 n=8) entrega un p-valor  $> 0,05$ , indicando que no existen diferencias significativas para la diversidad de fitoplancton entre puntos de muestreo.

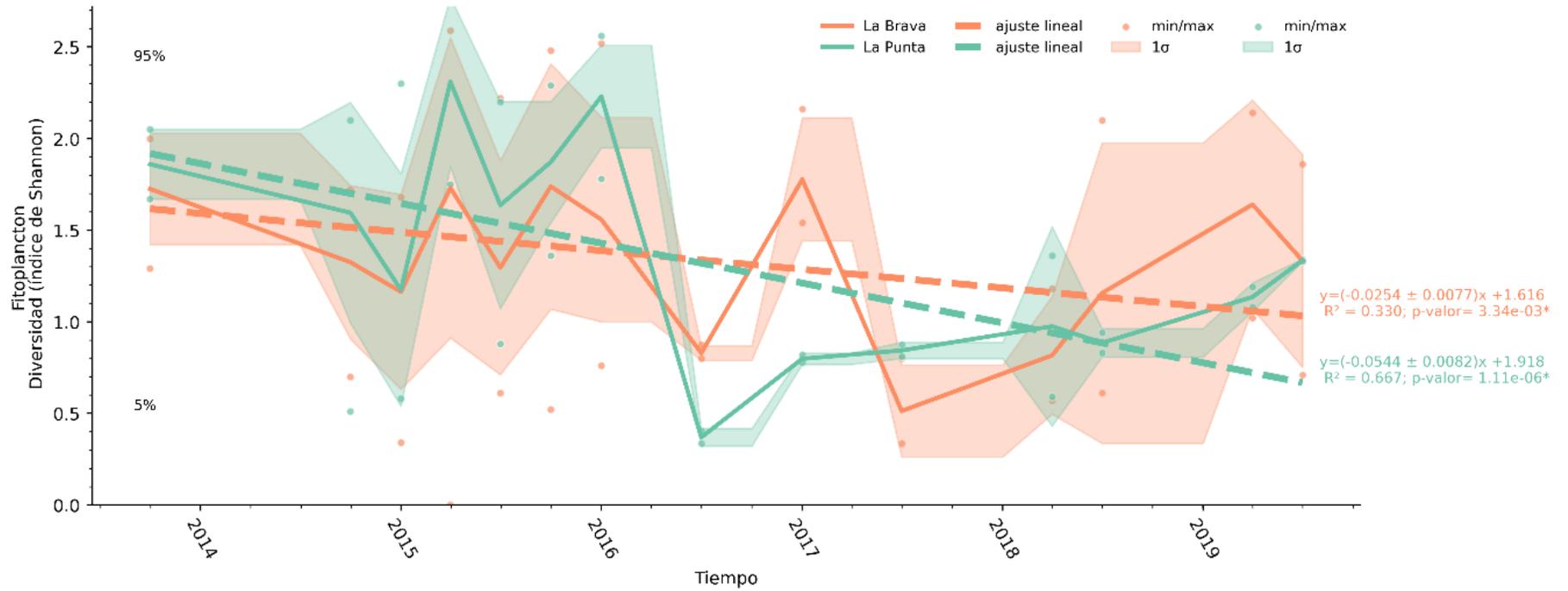


Figura 6-128 Diversidad de fitoplancton en La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

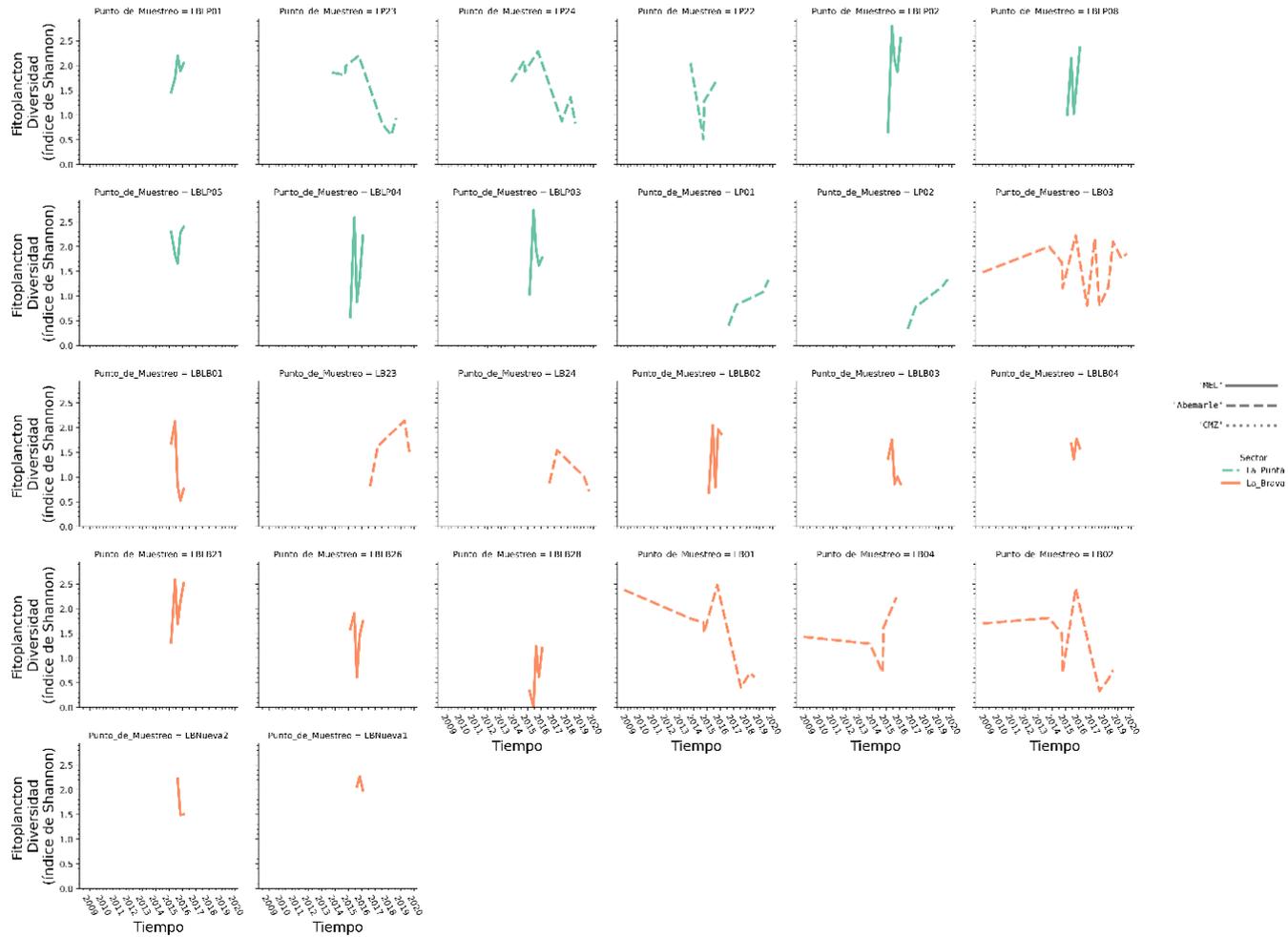


Figura 6-129 Análisis temporal y espacial de diversidad de fitoplancton de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.2.3. Zoobentos

Los taxa de las comunidades zoobentónicas registradas en el área de influencia directa se representan en la Tabla 6-58.

Tabla 6-58 Composición taxonómica de zoobentos registrada en La Punta y La Brava.

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa
Arachnida				<i>Acari</i>
Clitellata	Lumbriculida			<i>Lumbriculidae</i>
Crustacea	Podocopida	Cyprididae	Eucypris	<i>Eucypris sp</i>
Gastropoda	Littorinimorpha	Amnicolidae		<i>Amnicolidae</i>
	Sorbeoconcha	Cochliopidae		<i>Cochliopidae</i>
	Littorinimorpha	Cochliopidae	Heleobia	<i>Heleobia atacamensis</i>
	Littorinimorpha	Cochliopidae	Heleobia	<i>Heleobia sp</i>
	Sorbeoconcha	Hydrobiidae		<i>Hydrobiidae</i>
Hexanauplia	Herpacticoida	Canthocamptidae	Canthocamptidae	<i>Canthocamptidae</i>
				<i>Herpacticoida</i>
Insecta	Diptera	Stratiomyidae		<i>Stratiomyidae</i>
	Diptera	Ceratopogonidae		<i>Ceratopogonidae</i>
	Diptera	Chironomidae		<i>Chironomidae</i>
	Diptera	Dolichopodidae		<i>Dolichopodidae</i>
	Coleoptera	Elmidae		<i>Elmidae</i>
	Diptera	Empididae		<i>Empididae</i>
	Diptera	Ephydriidae		<i>Ephydriidae</i>
	Odonata	Lestidae		<i>Lestidae</i>
	Diptera	Tipulidae		<i>Limoniidae</i>
	Diptera	Syrphidae		<i>Syrphidae</i>
Malacostraca	Amphipoda	Hyalellidae	Hyalella	<i>Hyalella</i>
	Amphipoda	Hyalellidae	Hyalella	<i>Hyalella sp</i>
	Amphipoda	Hyalellidae		<i>Hyalellidae</i>
<i>Oligochaeta</i>				<i>Oligochaeta</i>
	Herpacticoida	Tubificidae/Naididae	Naididae	<i>Naididae</i>
Ostracoda				<i>Ostracoda</i>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-59 Estadígrafos de zoobentos por laguna

	ZBDv		ZBDa		ZBS		ZBH	
	LB	LP	LB	LP	LB	LP	LB	LP
N observaciones	37	26	83	60	99	72	73	52
Promedio	13182,64	17851,39	6472,90	13128,26	1,91	2,57	0,24	0,35
SD	44071,86	90426,29	10743,95	33038,74	1,41	1,77	0,33	0,44
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	233400,00	461200,00	46717,00	240333,00	6,00	7,00	1,39	1,42
MWTest (p-valor)	0,464117868		0,190388373		0,042041648		0,40175546	
Dif.sig.	No		No		Sí		No	

Fuente: Elaboración propia. Dif.sig: Diferencia significativa; LB: La Brava; LP: La punta; ZBDv: Densidad en volumen de zoobentos; ZBDa: Densidad en área de zoobentos; ZBS: riqueza de zoobentos; ZBH: Diversidad de zoobentos

### I. Densidad

El análisis para las comunidades zoobentónicas en relación a la densidad presenta diferencias en unidades registradas en terreno, ya que los datos se presentan en ind/m<sup>2</sup> e ind/L, por lo que el análisis se realizará por separado. En la Figura 6-130, se observa que el promedio de densidad máximo en La Brava se registra en invierno 2014, en el punto de muestreo LB-4 con 461200 ind/L por Albemarle, y en verano 2017 en el punto de muestreo LB-23 con 31592,4 ind/m<sup>2</sup> por Albemarle. Los valores mínimos promedios registrados en La Brava se observan en verano 2015, en otoño 2014 en el punto de muestreo LB-3 con 2 ind/L por Albemarle, y en primavera 2015 en el punto de muestreo LBLB-04 con 126 ind/m<sup>2</sup> por Minera Escondida.

En la laguna La Punta, los valores promedio más alto de densidad se encuentran en invierno 2015, en el punto de muestreo LBLP-01 con 240333 ind/m<sup>2</sup> por Minera Escondida, también en invierno 2015 se registra el valor promedio alto en La Punta, en el punto de monitoreo LP-23 con 461200 ind/L por Albemarle. Por otra parte, el valor promedio mínimo se encuentra en otoño 2014, en los puntos de muestreo LP-22 y LP-24 con 2 ind/L para ambos puntos, y en verano 2016 en el punto de muestreo LBLP-02 con 126,3 ind/m<sup>2</sup> por Minera Escondida.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie del sistema lagunar de La Punta presenta tendencias de disminución significativa de densidad (área), con una pendiente de -4614,98 ind/m<sup>2</sup>/año ( $r^2=0,875$ ; Wtest p-valor < 0,001). En tanto, para la serie de La Brava se obtiene un coeficiente de determinación menor a 0,10.

Luego, considerando la base de volumen, al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-131), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=7, LB03 n=11 y LB01 n=7) entrega un p-valor ligeramente > 0,05, indicando que no existen diferencias significativas para la densidad del zoobentos entre puntos de muestreo.

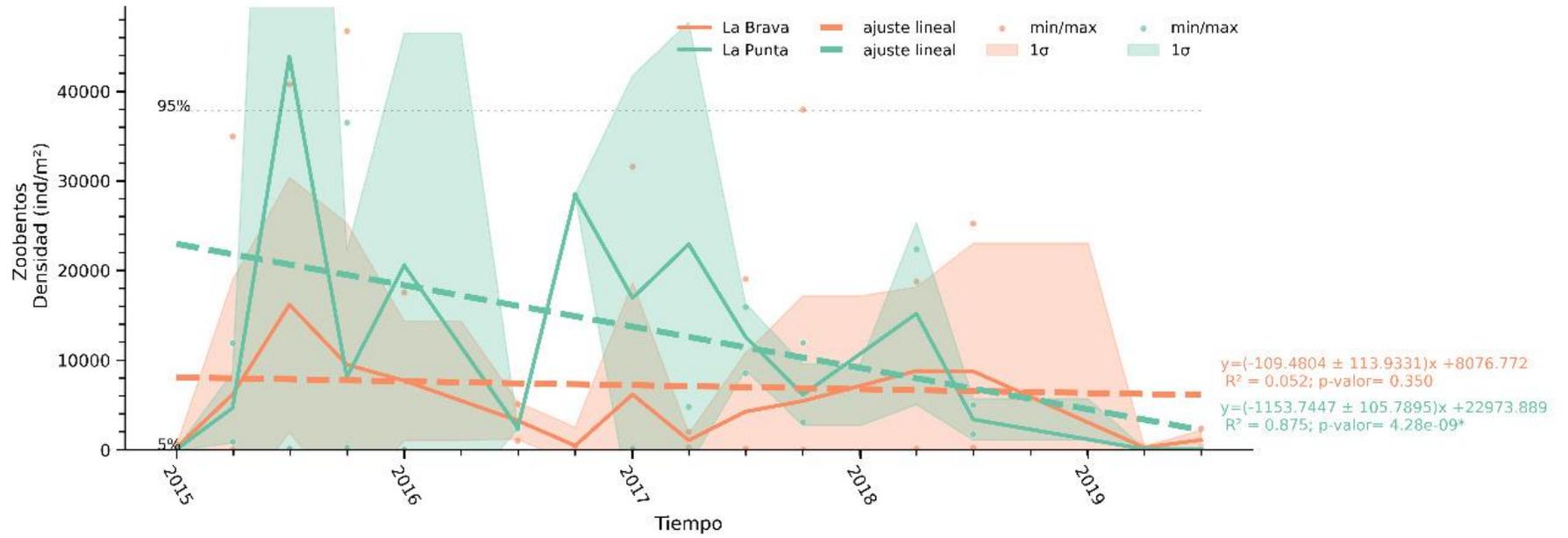


Figura 6-130 Densidad de zoobentos (ind/m<sup>2</sup>) en La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

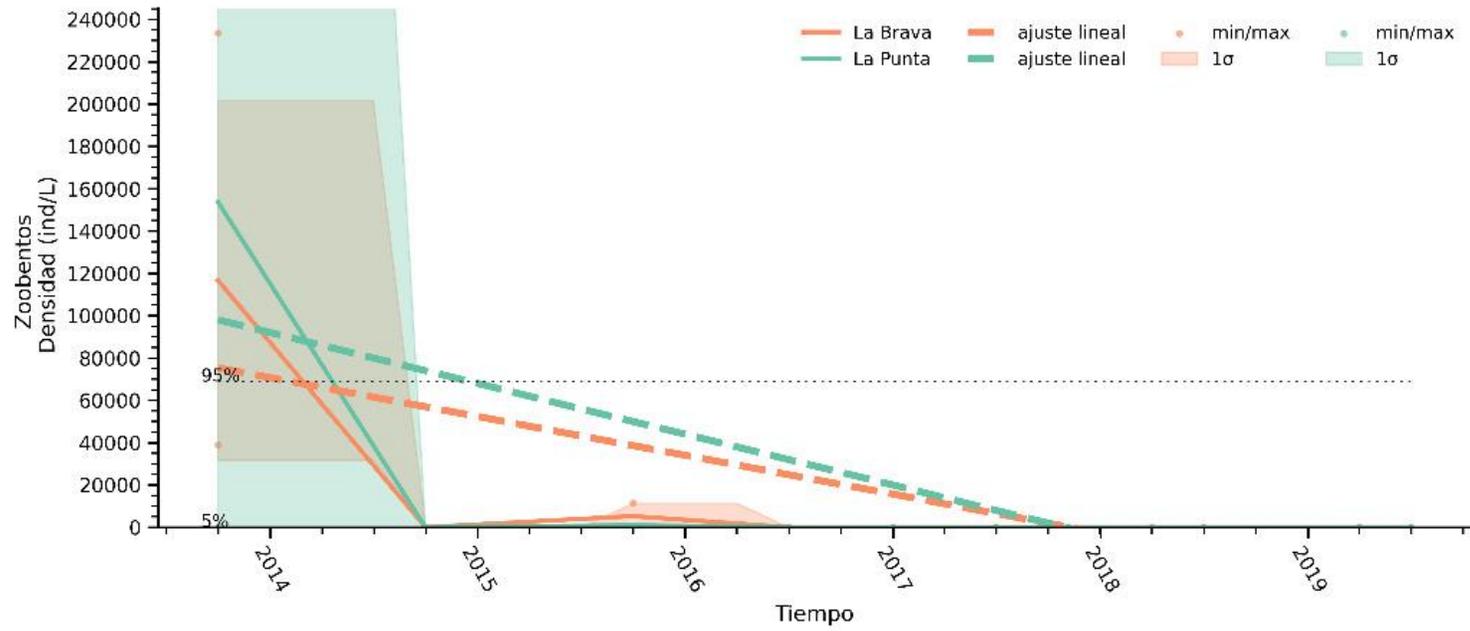


Figura 6-131 Densidad de zoobentos (ind/L) en La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1\sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.



Figura 6-132 Análisis temporal y espacial de densidad de zoobentos de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

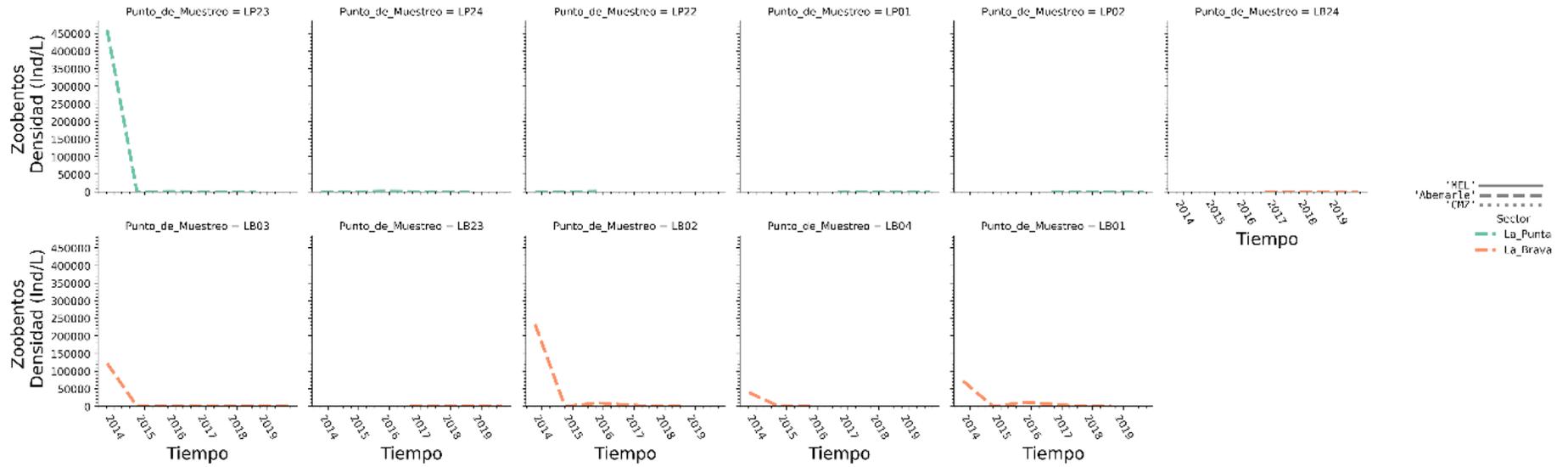


Figura 6-133 Análisis temporal y espacial de densidad de zoobentos de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

## II. Riqueza

Los valores de riqueza promedio presentan un comportamiento similar en ambas lagunas, observando el mayor valor promedio en invierno 2016 en La Brava, el punto de monitoreo LB-3 registro 6 *taxa* por Albemarle. El valor mínimo promedio registrado se observa en primavera 2015, el punto de monitoreo LBLB-01 y LBLB-02 presentaron 1 taxón registrada por Minera Escondida.

Los valores de riqueza promedio más altos registrados en La Punta se observan en invierno 2016, el punto de muestreo LP-2 con 5 *taxa* por Albemarle. El valor promedio mínimo de riqueza se observa en verano 2015, el punto de muestreo LB-LP03 registró 1 taxón por Minera Escondida, así como también en el punto de muestreo LP-23 con 1 taxón por Albemarle.

Ambas lagunas fueron evaluadas a una resolución temporal estacional (Figura 6-134), indicando la dispersión de los datos de  $1 \sigma$  y mostrando los valores mínimos y máximos por período. Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que las series de tiempo (2014 a 2019) presentan tendencias de aumento significativo de riqueza, donde se obtiene que el aumento observado tiene una pendiente en La Punta de 0,18 *taxa/año* ( $r^2=0,165$ ; Wtest p-valor < 0,05) y en La Brava una pendiente de -0,19 *taxa/año* ( $r^2=0,627$ ; Wtest p-valor < 0,001).

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-135), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=8, LB03 n=12 y LB01 n=8) entrega un p-valor > 0,05, indicando que no existen diferencias significativas para la riqueza de zoobentos entre puntos de muestreo.

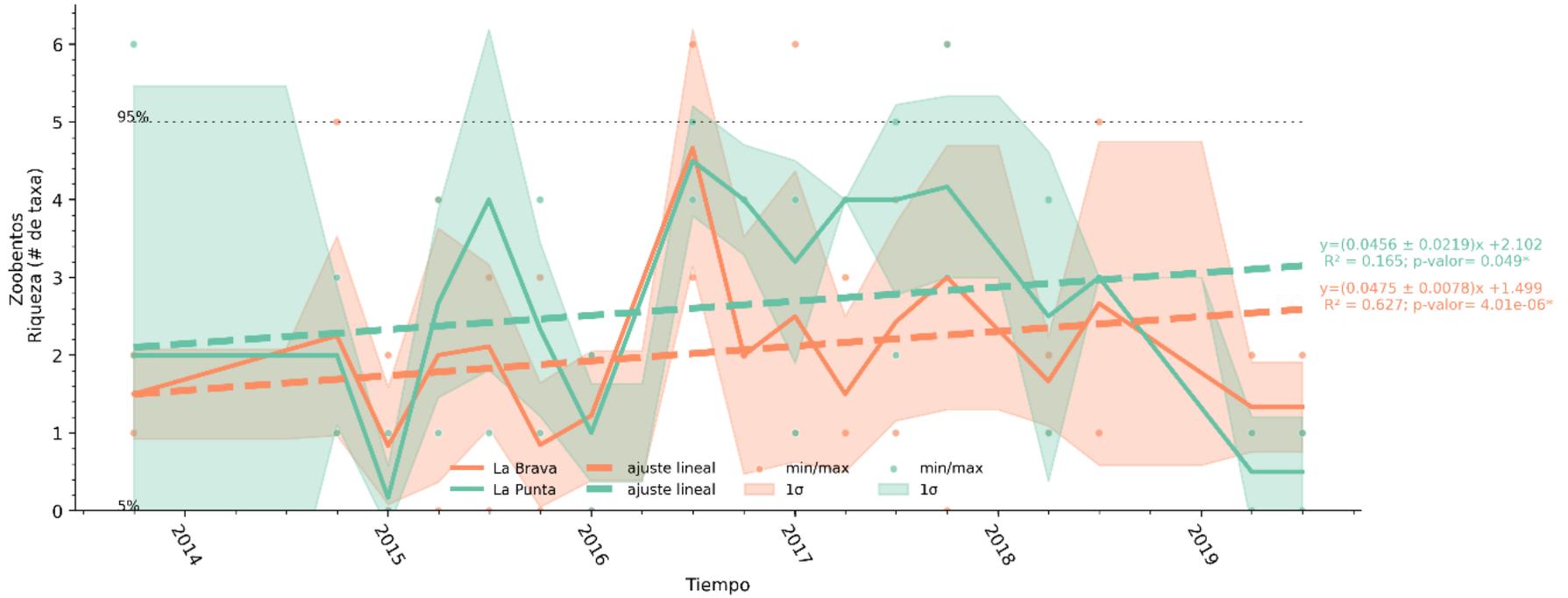


Figura 6-134 Riqueza de zoobentos en La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

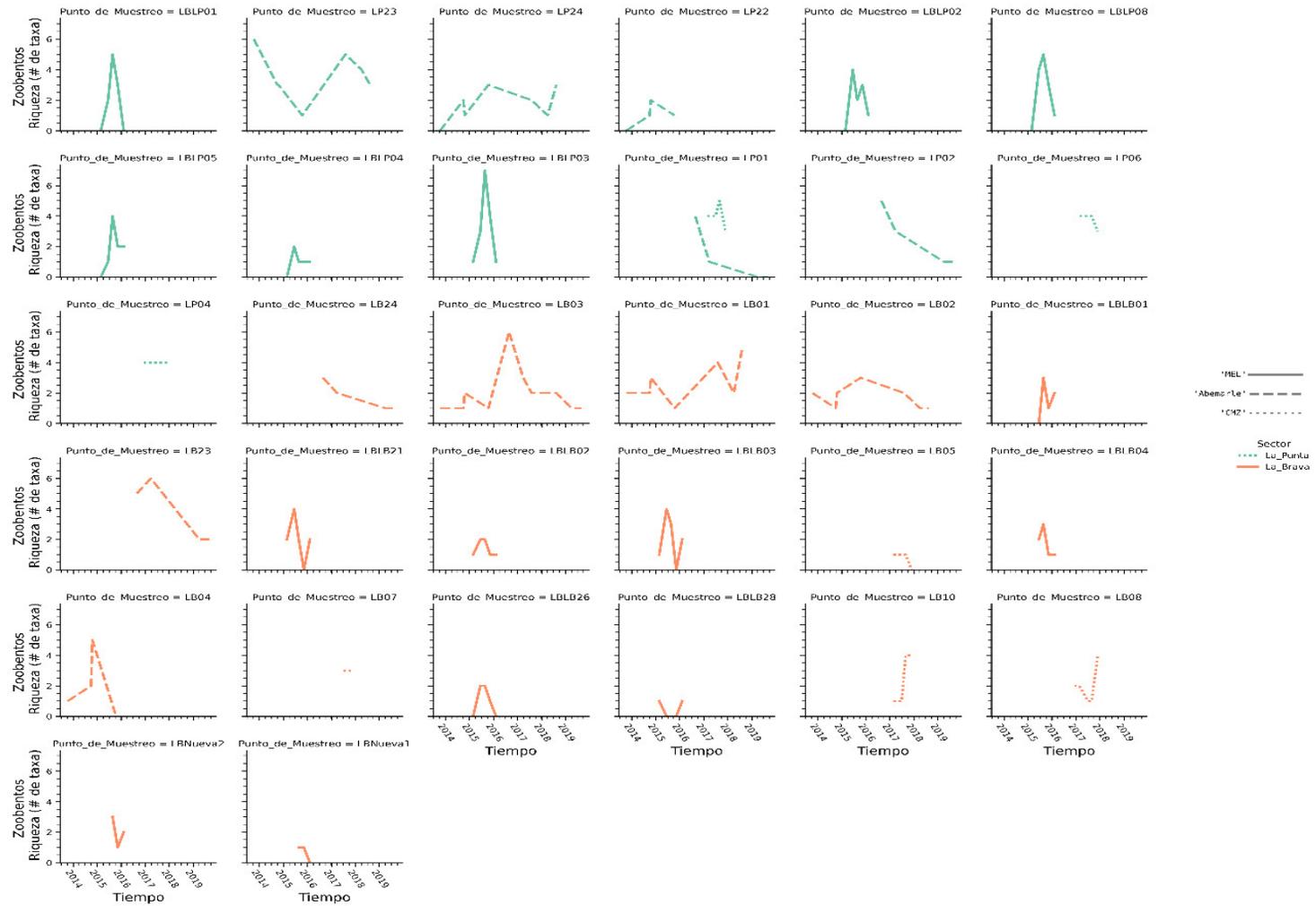


Figura 6-135 Análisis temporal y espacial de riqueza de zoobentos de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

### III. Diversidad

La diversidad (índice de Shannon) en La Brava presenta el promedio máximo en invierno 2015, el punto de muestreo LBLB-26 con 0,03. El valor promedio mínimo se registró en verano 2016, el punto de muestreo LBLB-03 presentó 0,06 por Minera Escondida.

En La Punta el valor promedio máximo se reportó en invierno 2018, los puntos de muestreo LP-24 y LP-23 con 0,88 por Albemarle. Mientras que el valor promedio mínimo registrado en La Punta se observa en verano 2016, el punto de muestreo LBLP-05 con 0,04.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie del sistema lagunar de La Punta presenta tendencias de disminución significativa de diversidad, con una pendiente de -0,1216 unidades/año ( $r^2=0,6162$ ; Wtest p-valor < 0,001). En tanto, para la serie de La Brava se obtiene un coeficiente de determinación menor a 0,10.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-137), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=7, LB03 n=9 y LB01 n=7) entrega un p-valor > 0,5, indicando que no existen diferencias significativas para la diversidad de zoobentos entre puntos de muestreo.

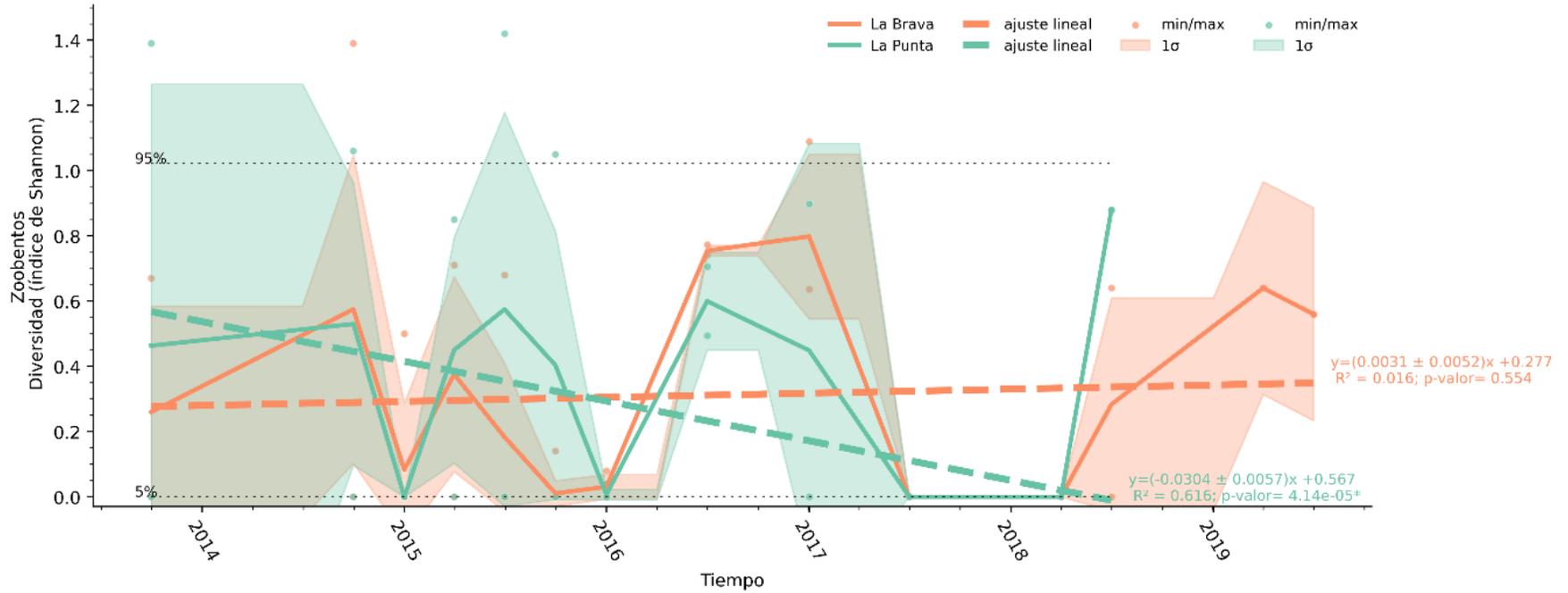


Figura 6-136 Diversidad de zoobentos en La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

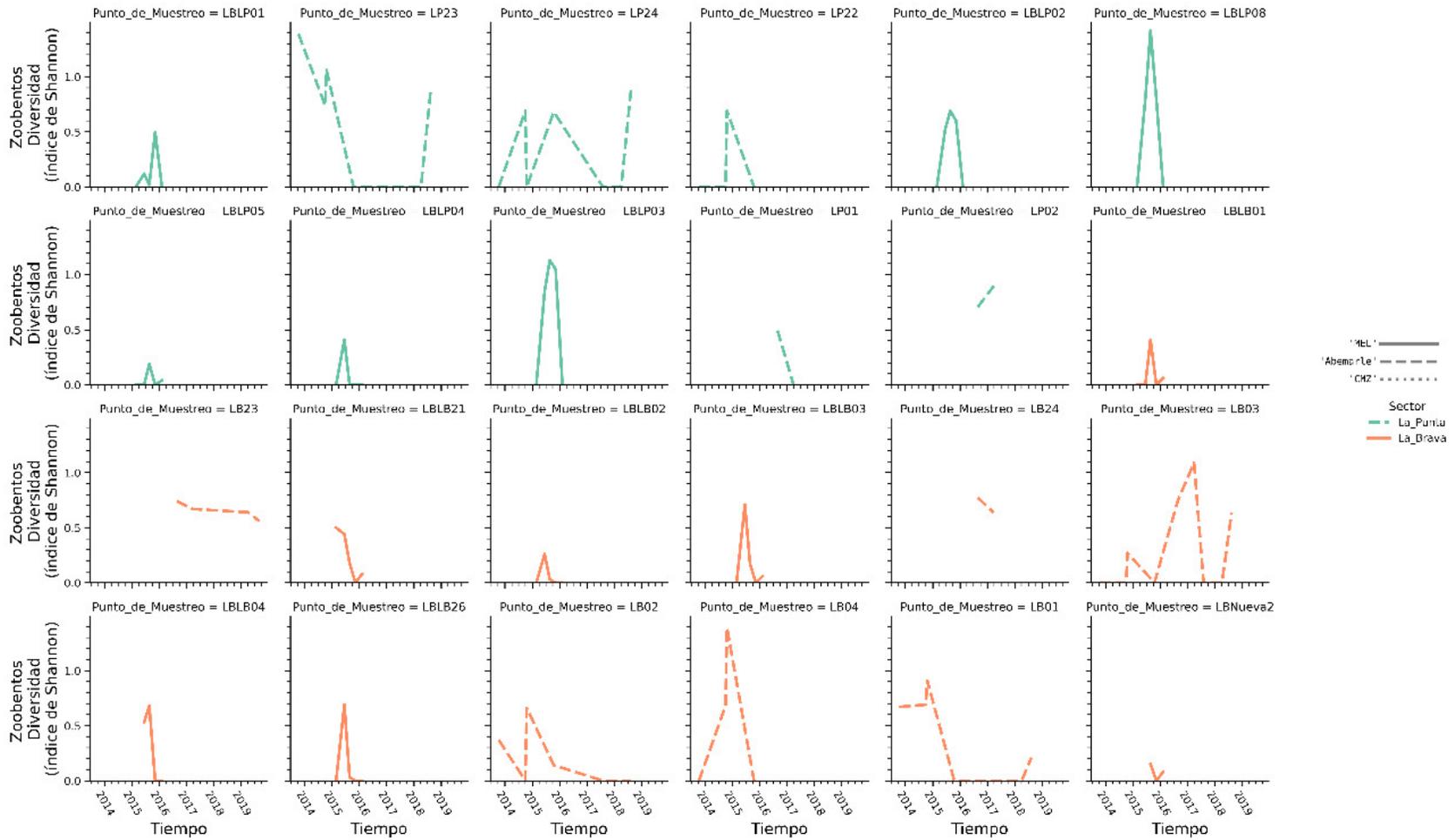


Figura 6-137 Análisis temporal y espacial de diversidad de zoobentos de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.2.4. Zooplancton

Los taxa encontrados en el área de influencia directa se representan en la Tabla 6-60.

Tabla 6-60 Composición taxonómica de Zooplancton registrada.

Clase	Orden	Familia	Género	Taxa
Branchiopoda		Artemiidae		<i>Artemia</i>
				<i>Artemia franciscana</i>
				<i>Artemia sp</i>
	Cladocera	Daphniidae	Daphnia	<i>Daphnia pulex</i>
Clitellata				<i>Oligochaeta</i>
Gastropoda	Sorbeoconcha	Cochliopidae		<i>Cochliopidae</i>
		Hydrobiidae		<i>Hydrobiidae</i>
		Planorbidae		<i>Planorbidae</i>
Hexanauplia	Herpacticoida	Canthocamptidae	Attheyella	<i>Attheyella sp</i>
	Clanoida	Centropagidae	Boeckella	<i>Boeckella bergi</i>
			Boeckella	<i>Boeckella sp</i>
			Boeckella	<i>Boeckella titicacae</i>
			Boeckella	<i>Boeckellidae</i>
		Calanoida		<i>Calanoida indet.</i>
	Cyclopoida	Cyclopidae		<i>Cyclopoida</i>
Herpacticoida		Canthocamptidae	Canthocamptidae	<i>Canthocamptidae</i>
				<i>Harpacticoida</i>
				<i>Tigriopus sp</i>
Insecta	Diptera	Ceratopogonidae		<i>Ceratopogonidae</i>
		Chironomidae		<i>Chironomidae</i>
		Dolichopodidae		<i>Dolichopodidae</i>
		Empididae		<i>Empididae</i>
		Ephydriidae		<i>Ephydriidae</i>
	Coleoptera	Elmidae		<i>Elmidae</i>
Malacostraca	Amphipoda	Hyaellidae	Hyaella	<i>Hyaella sp</i>
Maxilopoda				<i>Copepoda</i>
				<i>Nauplius</i>
Monogononta	Ploima	Notommatidae	Cephalodella	<i>Cephalodella</i>
N/A	N/A	N/A	N/A	<i>Zooplankton indet</i>
Ostracoda				<i>Ostracodo</i>
	Podocopida	Cypridae	Nauplius	<i>Eucypris sp</i>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-61 Estadígrafos de zooplancton por laguna

	ZPD		ZPS		ZPH	
	La Brava	La Punta	La Brava	La Punta	La Brava	La Punta
N observaciones	104	72	104	72	79	56
Promedio	110,89	127,88	3,02	3,33	0,66	0,45
SD	918,96	396,19	1,36	1,81	0,37	0,38
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	9.375,00	2.537,50	7,00	8,00	1,49	1,34
MWtest (p-valor)	0,139299245		0,129040801 (T-test)*		0,225581774	
Dif.sig.	No		No		No	

Fuente: Elaboración propia. \*Ambos tienen distribución normal; Dif.sig: diferencia significativa; ZPD: Densidad de zooplancton; ZPS: Riqueza de zooplancton; ZPH: Diversidad de zooplancton

## I. Densidad

En la Figura 6-138 muestra la densidad (ind/L) por cada año de muestreo entre los años 2008 a 2019 en la Punta y La Brava. Se observan densidades similares entre sí fluctuando entre 1,75 y 31,26 ind/L. en la Brava, excepto en invierno 2017 donde se observó presencia de *Boeckella* con una densidad de 157,86 ind/L. Sin embargo, en la Punta la densidad de individuos fue mayor; en invierno 2013 se observó *Boeckella* y *Atheyela*, en invierno 2017 y 2018 las densidades de *Boeckella* fueron importantes junto a *Artemia francisana*.

Ambas lagunas fueron evaluadas a una resolución temporal estacional (Figura 6-138), indicando la dispersión de los datos de  $1\sigma$  y mostrando los valores mínimos y máximos por período.

Para el análisis de series temporales, al aplicar un ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a las series se obtuvieron coeficientes de determinación inferior a 0,10 y un p-valor no significativo. Debido a esto, no se puede afirmar una tendencia de aumento o disminución con respaldo estadístico.

En tanto, al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-139), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=9, LB03 n=13 y LB01 n=9) entrega un p-valor < 0,001, indicando que existen diferencias significativas para la densidad del zooplancton entre algún punto de muestreo. Al aplicar un Dtest, no obstante, no se encontró un par de puntos con un p-valor < 0,05.

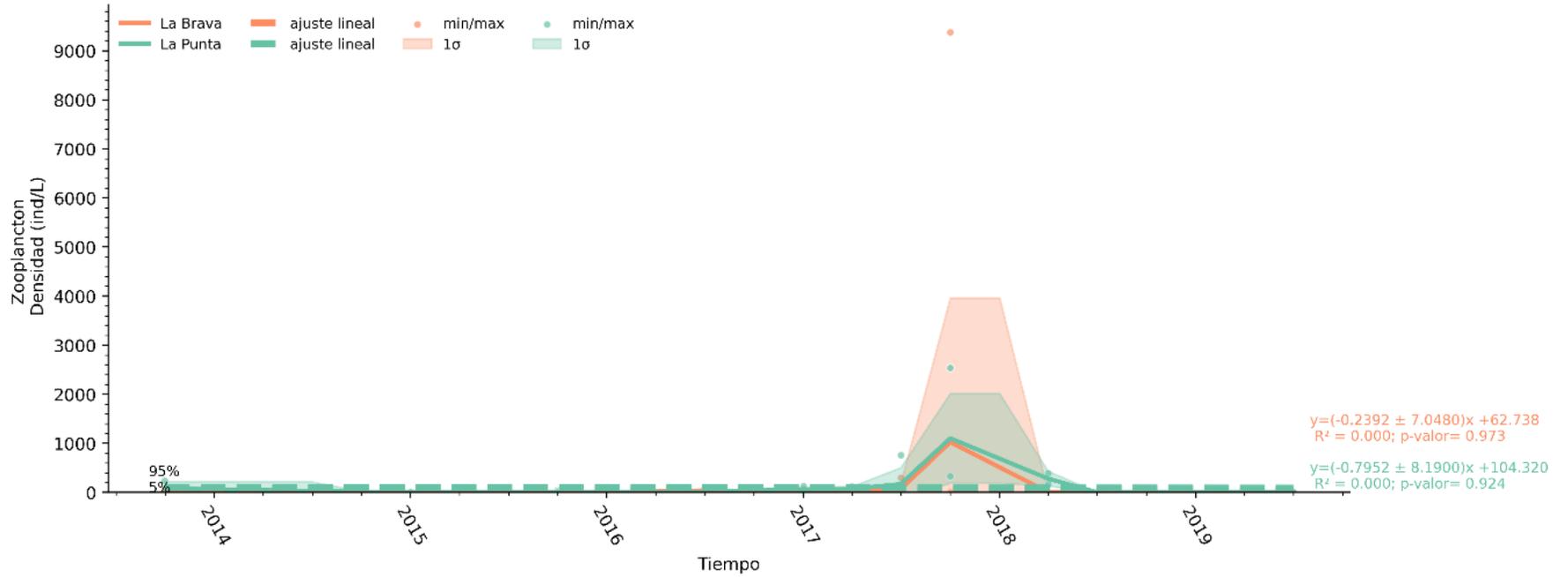


Figura 6-138 Densidad en zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.



Figura 6-139 Análisis temporal y espacial de densidad de zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

## II. Riqueza

En relación a la riqueza los valores máximos fueron en los meses de verano, relacionados directamente con la densidad de zooplancton. Si bien esta variable indica una baja riqueza en los sistemas lagunares mostraría una leve tendencia al aumento en los meses de mayor temperatura, (primavera-verano) y una disminución en los meses de menor temperatura (otoño-invierno) con lo cual se puede inferir que el aumento en la riqueza estaría directamente relacionado con la temperatura y los niveles de concentración de las sales disueltas en el agua.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie del sistema lagunar de La Punta presenta tendencias de aumento significativo de riqueza, con una pendiente de 0,62 *taxa/año* ( $r^2=0,570$ ; Wtest p-valor < 0,001). En tanto, para la serie de La Brava se obtiene un coeficiente de determinación menor a 0,10.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-141), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=7, LB03 n=9 y LB01 n=7) entrega un p-valor > 0,05, indicando que no existen diferencias significativas para la riqueza de zooplancton entre puntos de muestreo.

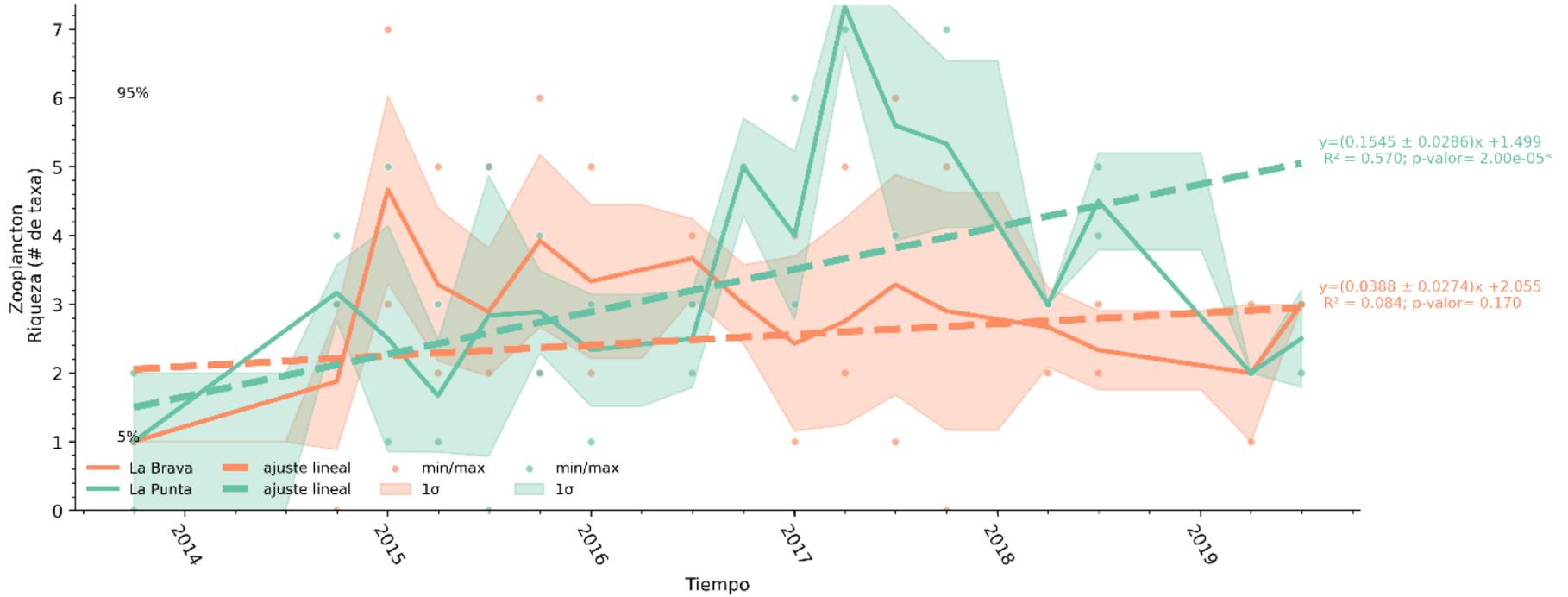


Figura 6-140 Riqueza en zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava.

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1 \sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

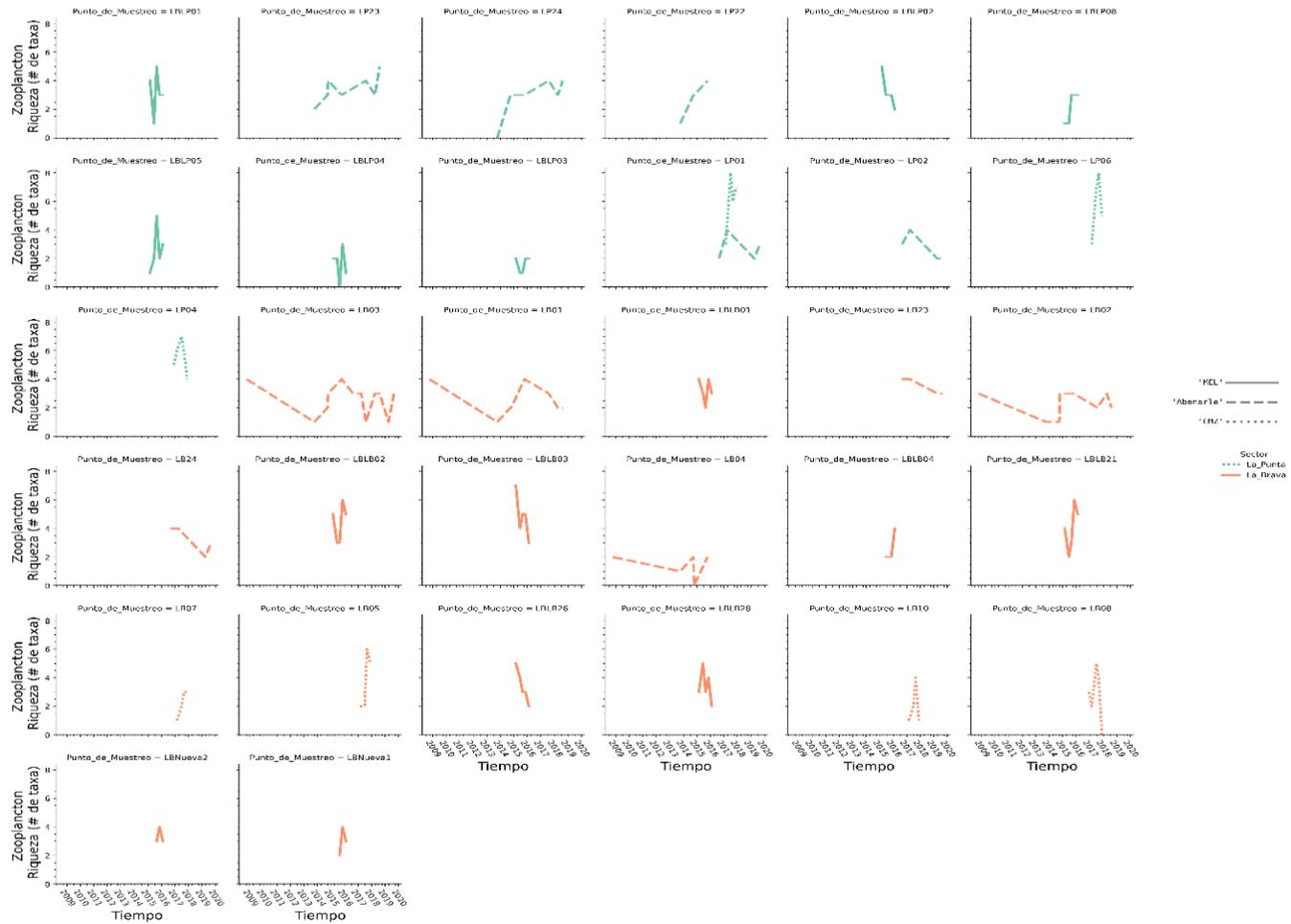


Figura 6-141 Análisis temporal y espacial de riqueza de zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia.

### III. Diversidad

Respecto a la diversidad se observaron valores en su mayoría menores a 1, el patrón de fluctuación de diversidad en zooplancton resultó ser similar entre temporadas con valores máximos en los meses de verano. Por otra parte, no se logra identificar una tendencia relacionada al análisis espacial inter e intra lagunas. Los valores observados indicaron que las lagunas poseen una diversidad relativamente baja.

Al realizar el ajuste lineal (regresión lineal de mínimos cuadrados) a cada curva, se observa que solo la serie del sistema lagunar de La Punta presenta tendencias de aumento significativo de diversidad, con una pendiente de 0,19 unidades/año ( $r^2=0,915$ ; Wtest p-valor < 0,001). En tanto, para la serie de La Brava se obtiene un coeficiente de determinación de 0,133, pero un p-valor (Wtest) > 0,05, por lo que la pendiente del ajuste no difiere significativamente de cero.

Al aumentar la resolución espacial a nivel de punto de muestreo (Figura 6-143), el KWtest (considerando LP23 n=7, LB02 n=8, LB03 n=10 y LB01 n=8) entrega un p-valor > 0,05, indicando que no existen diferencias significativas para la diversidad de zooplancton entre puntos de muestreo.

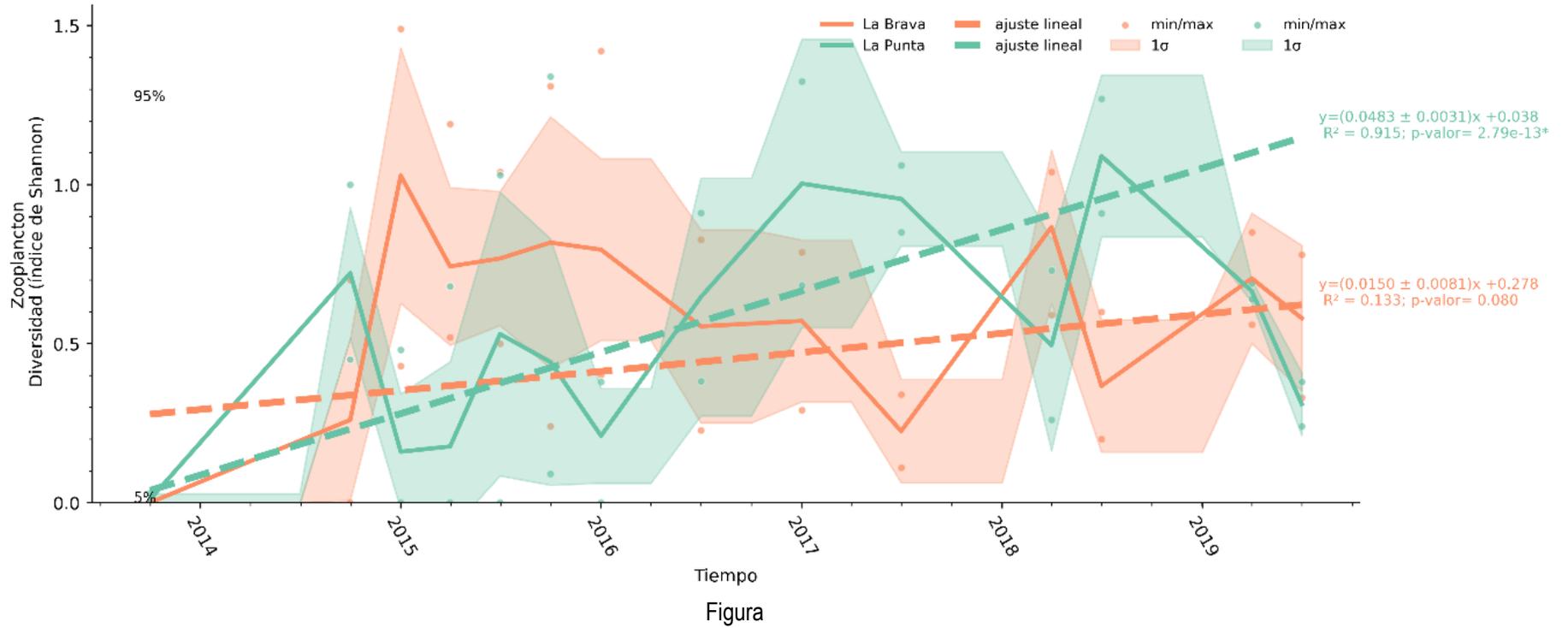


Figura 6-142 Diversidad en zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia. Valores del promedio estacional están graficados con líneas sólidas continuas; área sombreada cubre  $\pm$  una unidad de desviación estándar ( $\pm 1\sigma$ ); ajuste lineal representado por línea segmentada.

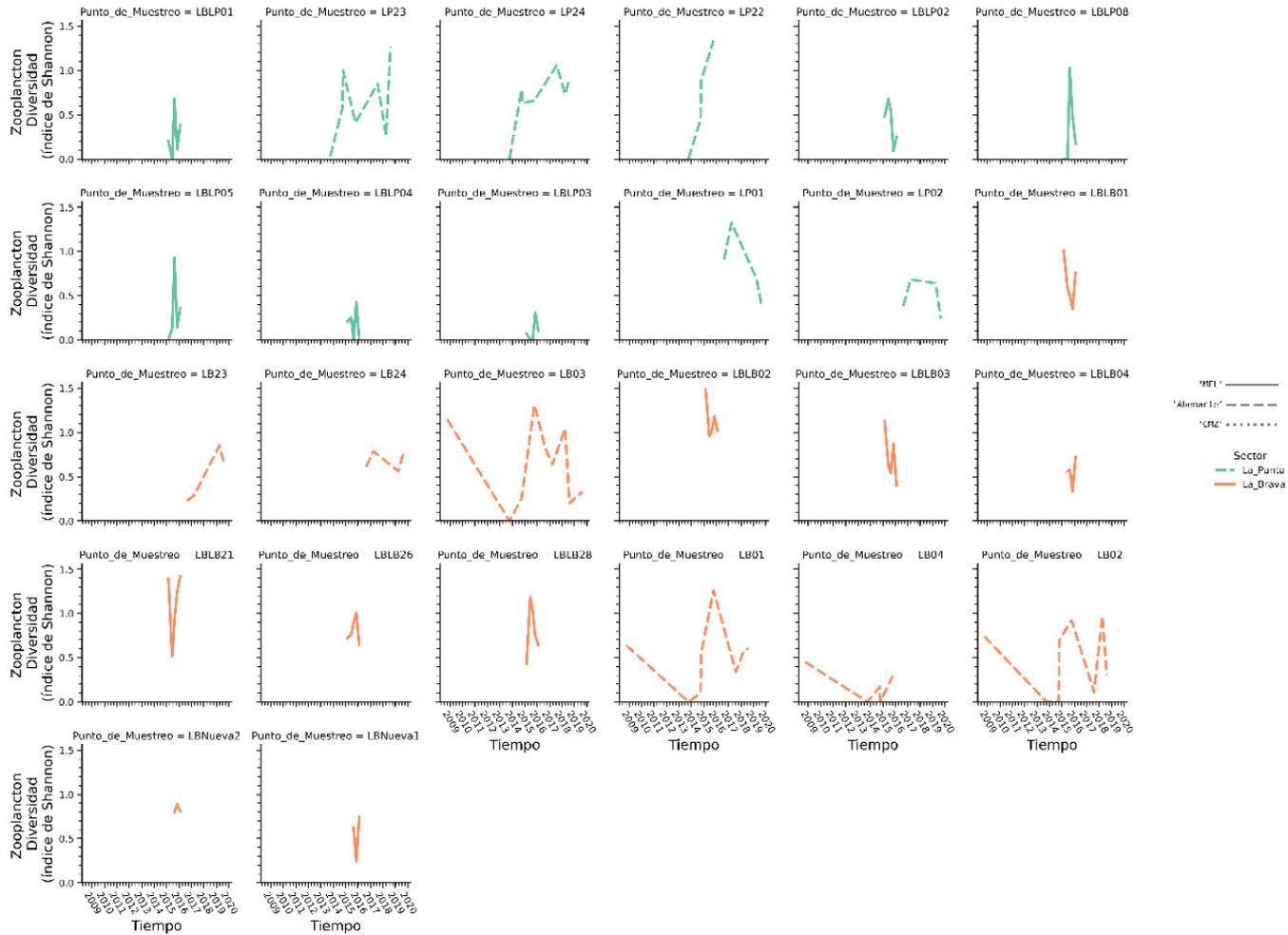


Figura 6-143 Análisis temporal y espacial de diversidad de zooplancton de las Laguna La Punta y La Brava

Fuente: Elaboración propia

### III. Microorganismos extremófilos

Las lagunas La Punta y La Brava presentan diversos ecosistemas microbianos, entre los que se destacan biofilms, microorganismos extremófilos y oncolitos, el cual predomina en las lagunas. Los oncolitos son microbialitos con forma redondeada (esferas) producto de movimientos constantes.

En menor cantidad se encuentran los biofilms, los cuales consisten en una película continua que cubre ambas lagunas, y los microorganismos extremófilos que se “llenan de aire como balones” producto la acumulación de gases y de la actividad orgánica que se da en la región inferior (CEA, 2017).

En La Punta y La Brava se presenta un gradiente característico de salinidad producto de la entrada y evaporación del suelo y del agua superficial. En ambas lagunas se desarrollan diferentes ecosistemas microbianos. Este desarrollo ocurre también a lo largo de la orilla de las lagunas, donde existe un elevado nivel de salinidad. Mientras que los oncolitos se encuentran sumergidos en las lagunas donde prevalece una salinidad inferior (Farías ME et al., 2014).

Mineralógicamente, en estas lagunas predomina la vía de los microbialitos de carbonato de calcio, los cuales se forma por la acción microbiana que, a través la fotosíntesis, inducen la precipitación de carbonato de calcio (CEA, 2017).

Tanto las publicaciones científicas como la línea de base de microorganismos extremófilos (CEA, 2017) hacen referencia a la diversidad de extremófilos en la Laguna La Brava, sin embargo, los puntos de muestreo se sitúan tanto en La Brava como en La Punta.

En total se describen 18 *taxa* para el sistema La Punta y La Brava:

- Acetothermia\_OP1
- Acidobacteria
- Bacteroidetes
- Caldithrix
- Chalmydiae
- Chloroflexi
- Crenarchaeota
- Crenarchaeota\_MBGB
- Cyanobacteria
- *Deinococcus thermus*
- Euryarchaeota
- Firmicutes
- Lentisphaerae
- Planctomycetes
- Proteobacteria
- Spirochaetes
- Thermi
- Verrucomicrobia

En algunos casos se señala solo la presencia de los *taxa* y en otros se determina la abundancia relativa, destacándose el taxón Proteobacteria.

### 6.3. Correlaciones temporales y espaciales de los factores ambientales

#### 6.3.1. Correlaciones variables abióticas

A continuación, se presentan matrices de correlación de Spearman, para las cuales se utilizaron los promedios estacionales de las variables nivel freático, nivel lagunar, superficie lagunar total, superficie de agua de dilución salina, evapotranspiración medida en domo, temperatura atmosférica y precipitación de las estaciones meteorológicas (Peine, Albemarle y Tilopozo), las que están ordenadas por subcapítulos.

Las siguientes tablas de matrices solo muestran correlaciones significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) que corresponden a los períodos respectivos indicado para cada conjunto de variables 1996-2018 y 2013-2018. Las celdas vacías corresponden a correlaciones de  $p$ -valor  $> 0,05$ .

Entre las variables temperatura atmosférica-superficie lagunar, temperatura atmosférica - superficie de agua de dilución salina, temperatura atmosférica- evapotranspiración, temperatura atmosférica-precipitación se estimaron correlaciones que tienen  $p$ -valor  $> 0,05$ , por lo que no se muestran.

Para el análisis se utilizó la tabla de interpretación del coeficiente de correlación de Spearman (

Tabla 5-11), excepto para las correlaciones entre las variables nivel freático-temperatura atmosférica y nivel lagunar-temperatura atmosférica.

##### 6.3.1.1 Nivel freático-Temperatura atmosférica y Precipitación

Se presenta una matriz de correlación de Spearman que contempla las variables nivel freático-temperatura atmosférica (Temp.), nivel freático-precipitación (Pp.) para el período 2013-2018) ( $n = 20$ ).

Se estima una relación directa entre niveles freáticos con temperatura atmosférica. Es decir, dada la fluctuación estacional de temperatura, podemos esperar una fluctuación similar para estas variables. Por esta razón se definió como alto un valor absoluto de correlación los resultantes mayores o iguales a 0,80 (Sánchez, f).

Tabla 6-62 Matriz de correlación de Nivel Freático-Temperatura atmosférica, Nivel freático-Precipitación, 2013-2018

Nivel freático		Temp. EM-Tilopozo	Temp. EM-ALB	Pp. EM-Peine	Pp. EM-ALB
Norte La Brava	BA-01			-0,24	
	BA-06	-0,92	-0,92		
	BA-09		-0,45	-0,52	-0,48
Borde	BA-02	-0,84	-0,82	-0,31	-0,16

La Brava	BA-05	-0,87	-0,83		
	TPZ13-C	-0,54	-0,56		
Sur La Brava	BA-03	-0,93	-0,89		
	BA-04	-0,87	-0,88		
	BA-16	-0,78	-0,79		
<b>Nivel freático</b>		<b>Temp. EM-Tilopozo</b>	<b>Temp. EM-ALB</b>	<b>Pp. EM-Peine</b>	<b>Pp. EM-ALB</b>
	BA-25	-0,55	-0,61		
Sur lejano La Brava	MP0-3A	-0,50	-0,63		
	MP0-3B	-0,83	-0,86		
	MP0-3C	-0,90	-0,89		
Norte La Punta	BA-10	-0,85	-0,84		
	BA-11	-0,67	-0,65	-0,27	
	BA-12	-0,91	-0,90		
Borde La Punta	BA-07	-0,77	-0,83		
	BA-13	-0,89	-0,93		
	BA-14	-0,83	-0,75		
	BA-15	-0,88	-0,85		
Sur La Punta	BA-08	-0,84	-0,84		
	MP0-1A	-0,91	-0,93		

Fuente: Elaboración propia; Pp.: precipitación; Temp.: Temperatura atmosférica; ALB: Albemarle

Desde 2013 a 2018 las correlaciones estimadas entre nivel freático-temperatura atmosférica ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) de ambas estaciones meteorológicas, Tilopozo y Rockwood-SCL, son generalmente altas en ambas lagunas y todas negativas, estimándose más correlaciones moderadas (-0,50 a -0,79) en La Brava que en La Punta. Además, un solo barreno (BA-09) al norte de La Brava presentó una correlación inferior a 0,50. La máxima correlación es de -0,93 entre la temperatura de EM- ALB y nivel freático de MP-01A.

En cambio, las correlaciones entre nivel freático-precipitación son negativas de tipo muy bajas a moderadas (-0,01 a -0,69), estimándose solo correlaciones significativas para tres piezómetros al norte y borde de La Brava y uno al norte de La Punta. Interpretamos que se estimaron correlaciones negativas entre nivel freático-precipitación por la correspondencia durante la estación estival de mayores precipitaciones y temperatura, lo que coincide con niveles freáticos bajos (Tabla 6-62).

Se podría inferir de lo anterior, que durante el verano la temperatura presenta mayor importancia que la precipitación en los niveles freáticos.

### 6.3.1.2. Nivel lagunar-Temperatura atmosférica y precipitación

Se presenta una matriz de correlación de Spearman que contempla las variables nivel lagunar-temperatura atmosférica (Temp.), nivel lagunar-precipitación (Pp.), para el período de 2013-2018 ( $n = 20$ ).

Se estima relación directa entre nivel lagunar con temperatura atmosférica. Es decir, dada la fluctuación estacional de temperatura, podemos esperar una fluctuación similar para estas variables, que responderían sincrónicamente. Por esta razón se definió como alto un valor absoluto de correlación mayor o igual a 0,80 (Sánchez, f). Se presentan solo correlaciones que tienen p-valor < 0,05, mostrándose celdas vacías para las correlaciones que tienen p-valor > 0,05.

Tabla 6-63 Matriz correlación Nivel lagunar -Temperatura atmosférica, Nivel freático-precipitación, 2013-2018

Nivel lagunar		Temp. EM-Tilopozo	Temp. EM-ALB	Pp. EM-Peine	Pp. EM-ALB
Borde La Brava	LB-21	-0,51	-0,66		
Sur La Brava	LB-26	-0,90	-0,88		
Borde La Punta	LB-28	-0,86	-0,89		
	LP-05	-0,70	-0,75		

Fuente: Elaboración propia; Pp.: precipitación; Temp.: Temperatura atmosférica; ALB: Albemarle

Todas las correlaciones nivel lagunar-temperatura atmosférica son negativas. Las correlaciones más bajas y de rango moderado (-0,50 a -0,79) se estimaron al borde de La Brava en LB-21, mientras que las más altas se estimaron al sur de La Brava en LB-26. Así también, las correlaciones al borde de La Punta en LB-28 son altas. En cambio, entre nivel lagunar-precipitación no se obtuvieron correlaciones significativas, por lo que no se indican en la Tabla 6-63.

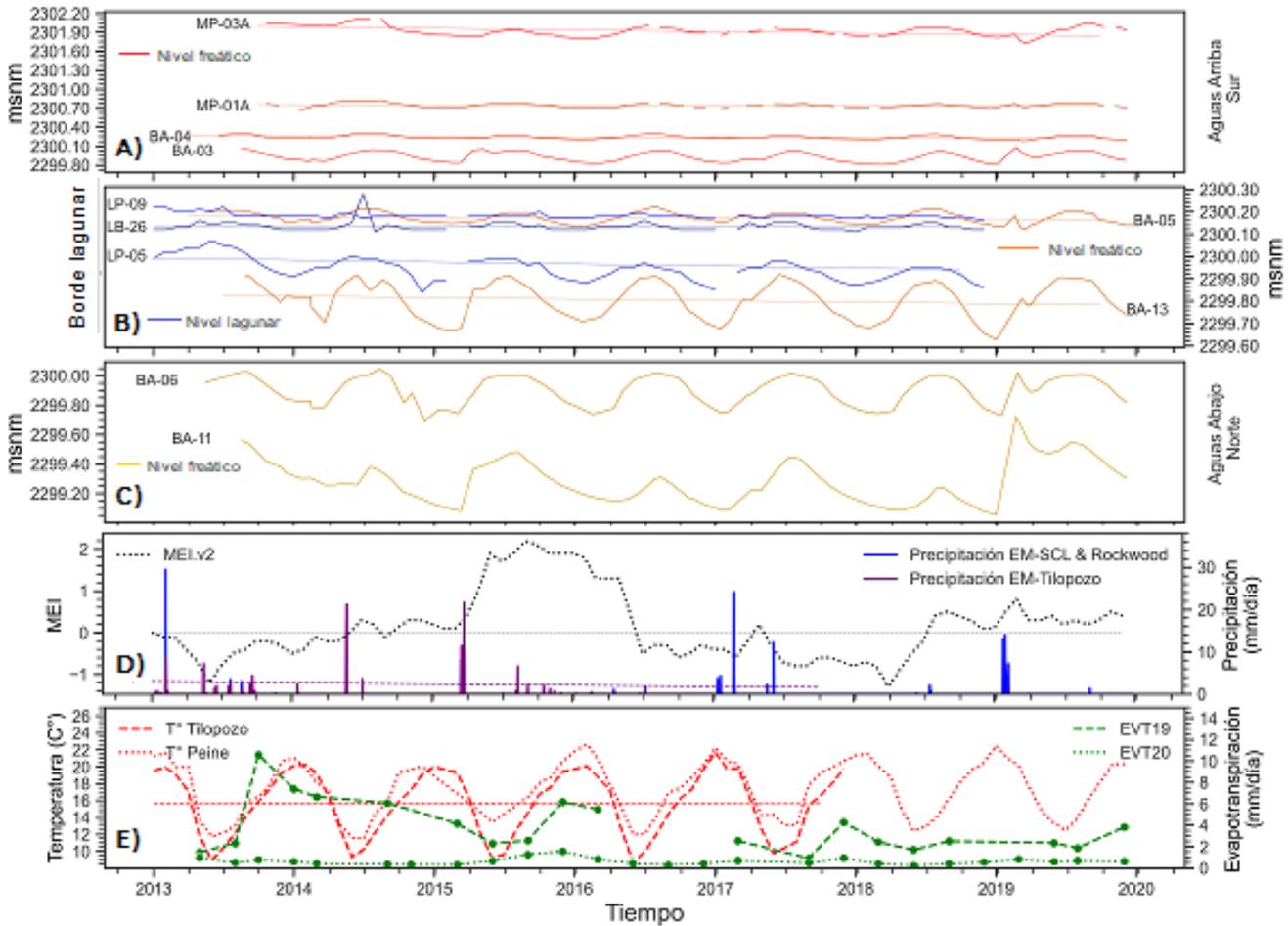


Figura 6-144 Variación temporal de: (A) niveles freáticos sur, (B) niveles freáticos y lagunares en borde, (C) niveles freáticos norte, (D) precipitación e índice multivariado de ENOS (Multivariate ENSO Index; MEI), (E) temperatura y evapotranspiración, 2013-2019. Fuente: Elaboración propia

Se observa en la Figura 6-144 A, B, C y D que los niveles freáticos tienen un comportamiento estacional, obteniéndose baja a muy baja correlación con el comportamiento de la precipitación en la mayoría de los niveles freáticos y lagunares, siendo significativa solo para algunos piezómetros, desde 2013 a 2018. En cambio, el comportamiento de los niveles freáticos y lagunares con la temperatura es inverso, apreciándose mayormente correlaciones altas y negativas. Para la evapotranspiración se observa disminución en EVT-19, desde 2013 a 2019, así también, pero más leve, para algunos niveles freáticos localizados aguas arriba, como en MP-03 A (Figura 6-144, B, C y E).

### 6.3.1.3. Nivel freático – Nivel lagunar

Se presenta una matriz de correlación de Spearman nivel freático-nivel lagunar 2013-2018 (n = 20), ordenadas por lagunas y sector.

Se presentan solo las correlaciones con un p-valor < 0,05, siendo las correlaciones en LP-08 no significativas (p -valor>0,05), por lo que no se muestran.

Tabla 6-64 Matriz de correlación Nivel freático-Nivel lagunar, 2013-2018

Nivel freático		Nivel lagunar				
		Borde La Brava		Sur La Brava	Borde La Punta	
		LB-21	LB-28	LB-26	LP-09	LP-05
Norte La Brava	BA-09					0,60
	BA-06	0,59	0,84	0,86		0,88
	BA-01					0,57
Borde La Brava	TPZ13-C	0,79	0,64	0,57		0,25
	BA-05	0,48	0,76	0,82		0,78
	BA-02	0,47	0,7	0,72		0,85
Sur La Brava	BA-25		0,7	0,64		0,61
	BA-16	0,40	0,7	0,78		0,76
	BA-04	0,42	0,75	0,84	0,59	0,85
	BA-03	0,58	0,82	0,81		0,90
Sur lejano La Brava	MP03-C	0,70	0,88	0,81		0,85
	MP03-B	0,69	0,84	0,78		0,81
	MP03-A		0,61	0,54		0,67
Norte La Punta	BA-12	0,6	0,85	0,86		0,95
	BA-11	0,28	0,55	0,61		0,81
	BA-10	0,55	0,78	0,8		0,88
Borde La Punta	BA-14	0,80	0,81	0,76		0,64
	BA-13	0,62	0,86	0,87	0,60	0,95
	BA-07	0,24	0,62	0,79	0,65	0,90
	BA-15	0,47	0,75	0,89		0,86
Sur La Punta	MP01-B	0,59	0,46			
	MP01-A	0,72	0,88	0,82		0,93
	BA-08	0,47	0,74	0,82		0,81

Fuente: Elaboración propia

Todas las correlaciones estimadas entre nivel lagunar - nivel freático son positivas durante el período 2013 a 2019, para los piezómetros y puntos de medición de nivel lagunar considerados en este análisis (Tabla 6-64).

Las correlaciones entre los niveles lagunares de LB-21 (La Brava) con los niveles freáticos de ambas lagunas son mayormente moderadas (rango 0,4 a 0,69), estimándose solo dos correlaciones bajas (rango 0,2 a 0,39) y cuatro altas (rango 0,7 a 0,89). Así también, son moderadas las correlaciones significativas de los niveles lagunares en LP-09 (La Punta) con los niveles freáticos de tres barrenos.

En cambio, la mayoría de las correlaciones significativas entre los niveles lagunares de LB-28 (La Brava) y LP-05 (La Punta) con los niveles freáticos de ambas lagunas son altas (rango 0,7 a 0,89), estimándose la más alta de 0,93 entre LP-05 y MP-01A (sur de La Punta) y la más baja de 0,25 entre LP-05 y TPZ-13C (borde de La Brava).

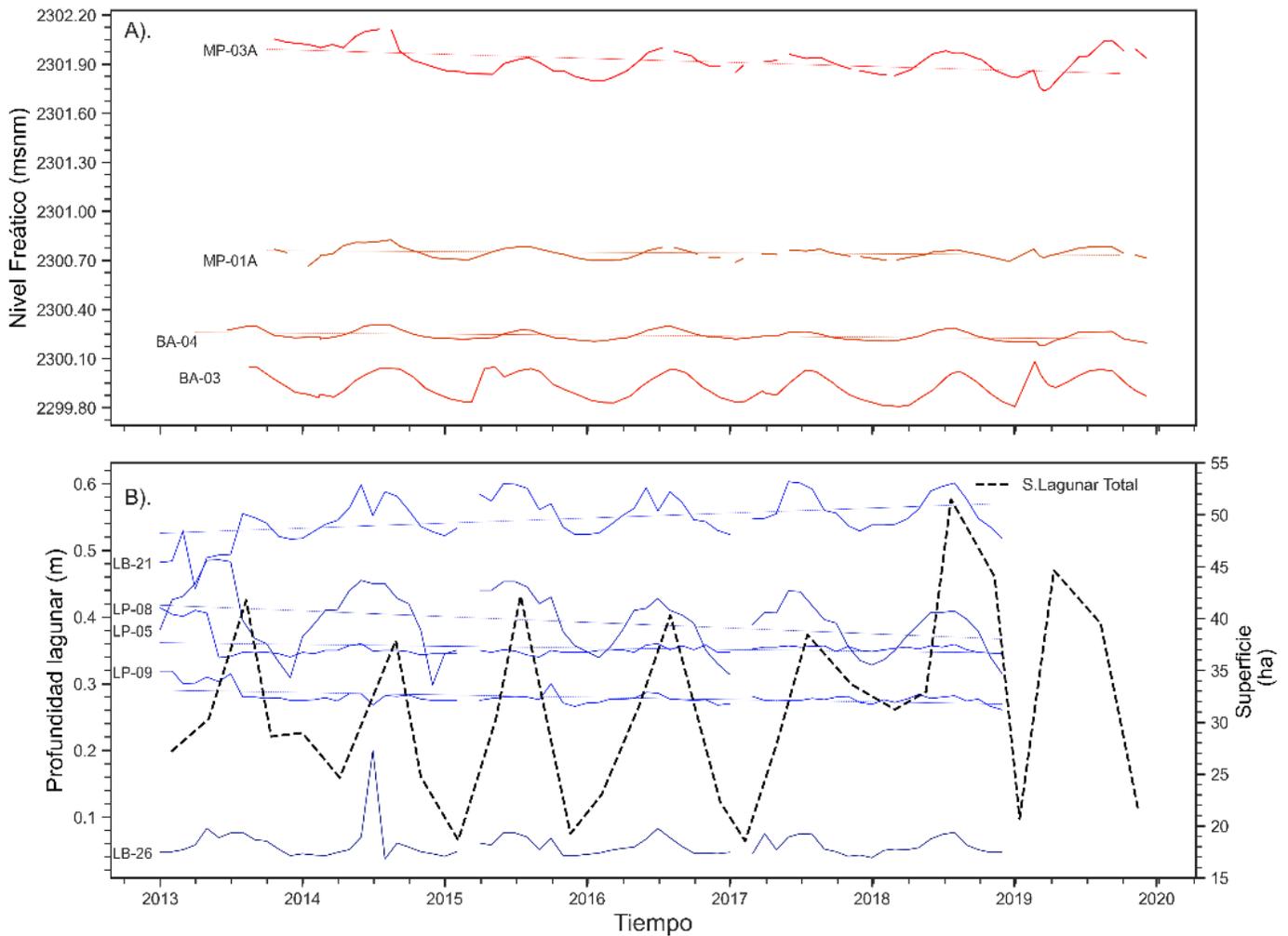


Figura 6-145 Variación temporal de (A) niveles freáticos sur, (B) niveles lagunares y superficie lagunar total, 2013-2019. Fuente: Elaboración propia

En la Todas las correlaciones estimadas entre nivel lagunar - nivel freático son positivas durante el período 2013 a 2019, para los piezómetros y puntos de medición de nivel lagunar considerados en este análisis (Tabla 6-64).

Las correlaciones entre los niveles lagunares de LB-21 (La Brava) con los niveles freáticos de ambas lagunas son mayormente moderadas (rango 0,4 a 0,69), estimándose solo dos correlaciones bajas (rango 0,2 a 0,39) y cuatro altas (rango 0,7 a 0,89). Así también, son moderadas las correlaciones significativas de los niveles lagunares en LP-09 (La Punta) con los niveles freáticos de tres barrenos.

En cambio, la mayoría de las correlaciones significativas entre los niveles lagunares de LB-28 (La Brava) y LP-05 (La Punta) con los niveles freáticos de ambas lagunas son altas (rango 0,7 a 0,89), estimándose la más alta de 0,93 entre LP-05 y MP-01A (sur de La Punta) y la más baja de 0,25 entre LP-05 y TPZ-13C (borde de La Brava).

Figura 6-145 A se presentan las series de tiempo de niveles freáticos localizados al sur de las lagunas y en Todas las correlaciones estimadas entre nivel lagunar - nivel freático son positivas durante el período 2013 a 2019, para los piezómetros y puntos de medición de nivel lagunar considerados en este análisis (Tabla 6-64).

Las correlaciones entre los niveles lagunares de LB-21 (La Brava) con los niveles freáticos de ambas lagunas son mayormente moderadas (rango 0,4 a 0,69), estimándose solo dos correlaciones bajas (rango 0,2 a 0,39) y cuatro altas (rango 0,7 a 0,89). Así también, son moderadas las correlaciones significativas de los niveles lagunares en LP-09 (La Punta) con los niveles freáticos de tres barrenos.

En cambio, la mayoría de las correlaciones significativas entre los niveles lagunares de LB-28 (La Brava) y LP-05 (La Punta) con los niveles freáticos de ambas lagunas son altas (rango 0,7 a 0,89), estimándose la más alta de 0,93 entre LP-05 y MP-01A (sur de La Punta) y la más baja de 0,25 entre LP-05 y TPZ-13C (borde de La Brava).

Figura 6-145B se presentan las series de tiempo de los niveles lagunares, además de la superficie lagunar total. Se observa para ambas variables (nivel freático y lagunar), que comparten fluctuaciones similares que responden a la estacionalidad. Cabe notar que LP-05 presenta el mayor rango de fluctuación entre los niveles lagunares y éste presenta el coeficiente de correlación más alto (0,93) con MP-01A.

#### 6.3.1.4. Nivel lagunar- Superficie lagunar

Se presenta una matriz de correlación de Spearman entre las variables nivel lagunar-superficie lagunar y de dilución salina para el período de 1996 a 2018 (n = 84).

Tabla 6-65 Matriz de correlación Superficie lagunar y de Dilución salina - Nivel lagunar, 1996-2018

Superficie	Niveles lagunares	
	La Brava	La Punta

	LB-26	LB-28	LB-21	LP-05	LP-08	LP-09
Lagunas total	0,33			0,70	-0,46	
Dilución Salina					0,24	-0,31
Lagunas total y Dilución Salina				0,36		-0,22

Fuente: Elaboración propia

Se observa que no hay correlaciones significativas entre superficie lagunar total (profunda + somera) o superficie de dilución salina con los niveles lagunares de La Brava, excepto en la reglilla LB-26, donde el coeficiente de correlación es bajo y positivo (0,33).

En cambio, en la laguna La Punta se observan correlaciones significativas tanto con la superficie lagunar total como con la superficie de dilución salina. El nivel lagunar de LP-05 correlaciona positivamente con la superficie lagunar total y con la superficie conjunta laguna/dilución salina. El nivel lagunar en LP-09 presenta correlaciones bajas (pero significativas) y negativas con la superficie de dilución salina y con superficie lagunar total más dilución salina. Cabe notar que el nivel lagunar de LP-09 no correlaciona significativamente con la superficie lagunar total, lo que contrasta con el valor relativamente alto obtenido para LP-05 (Tabla 6-65).

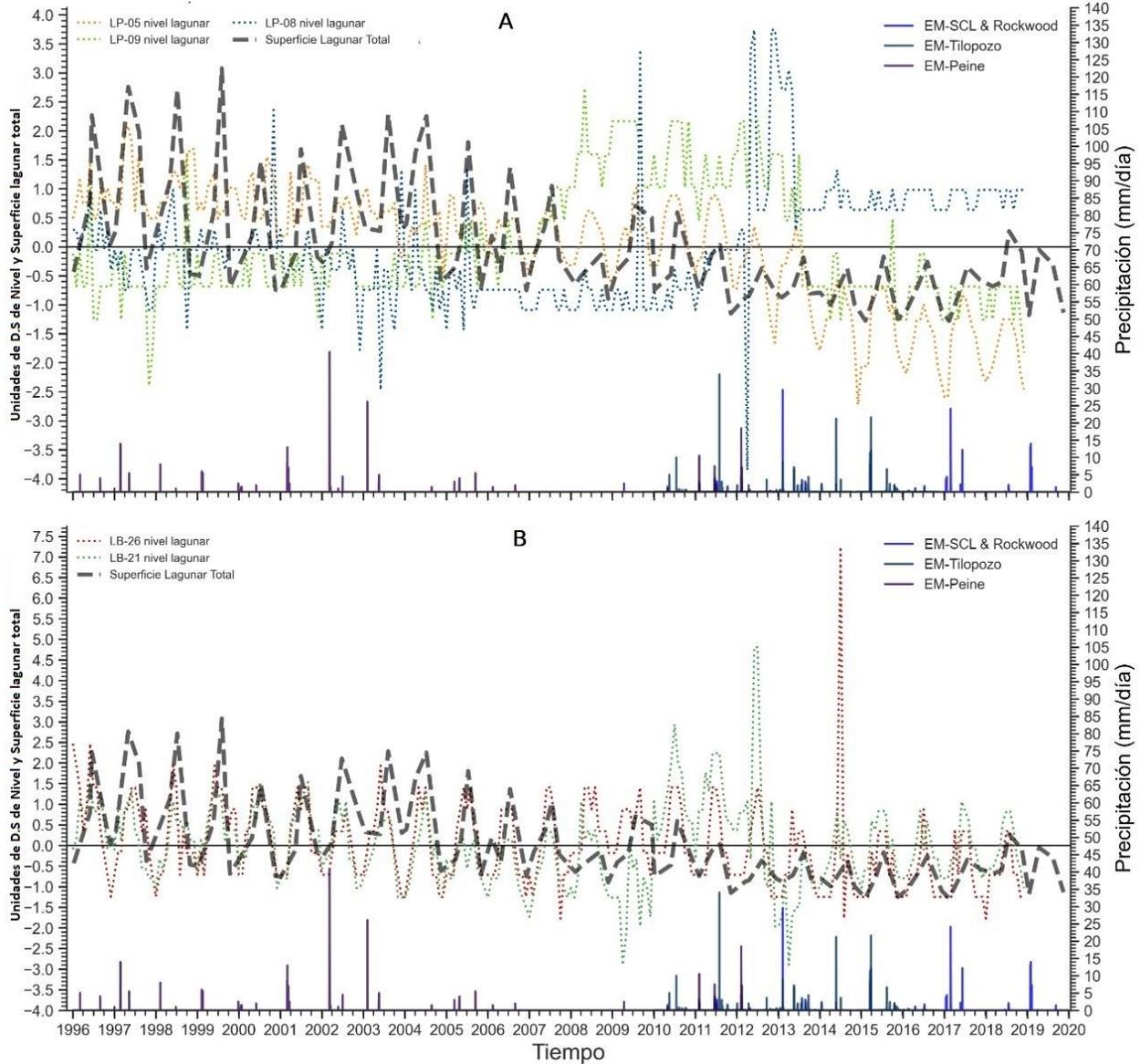


Figura 6-146 Variación temporal de superficie lagunar total, precipitación, niveles lagunar de (A) La Punta y (B) de La Brava, 1996-2019. Fuente: Elaboración propia

Se observa en Figura 6-146 A una coevolución relativamente estrecha de los niveles lagunares medidos en LP-05 y la serie temporal de la superficie lagunar total, respaldado además por el coeficiente de correlación previamente destacado. Figura 6-146 B ilustra los niveles lagunares de La Brava, donde los niveles lagunares en LB-26 y LB-21 también presentan una coevolución similar con la serie de tiempo de la superficie lagunar total desde 1996 a 2008. Posteriormente, desde 2009 a 2019, se observa una divergencia entre ambas (nivel lagunar y superficie), lo que podría explicar la baja correlación entre LB-21 y superficie lagunar total.

Además, se observa que los eventos de precipitación aumentan en frecuencia y magnitud desde 2010 a 2019, lo que no es reflejado en la serie temporal de la superficie lagunar que presenta valores por debajo de la media para este período.

### 6.3.1.5. Evapotranspiración y Precipitación- Nivel freático y Superficie

Se presenta una matriz de correlación de Spearman entre las variables evapotranspiración (EVT)- nivel freático, evapotranspiración (EVT)- superficie lagunar y de dilución salina, precipitación (Pp.) - nivel freático, precipitación (Pp.)- superficie lagunar y de dilución salina, índice multivariado de ENOS (Multivariate ENSO Index; MEI)- superficie lagunar y de dilución salina, durante el período 2013-2018 (n = 20).

En la matriz de correlación se presentan solo las correlaciones de p-valor significativo (p-valor < 0,05), estimándose solo para los niveles freáticos de La Brava, en TPZ-10, TPZ-7B, TPZ-13C y BA-02, durante el período 2013- 2018. Las correlaciones obtenidas entre evapotranspiración-temperatura, evapotranspiración-precipitación y evapotranspiración-nivel lagunar tienen p-valor > 0,05 por lo que no se indican en la Tabla 6-66..

Tabla 6-66 Matriz de correlación Evapotranspiración y Precipitación - Nivel freático y Superficies, 2013-2018

	Nivel freático La Brava				Superficie		
	Sur lejano		Borde		Lagunas Total	Dilución Salina	Lagunas y Dilución Salina
	TPZ-10	TPZ-7B	TPZ-13C	BA-02			
EVT-19	0,32		-0,39				
EVT-20		-0,28				0,69	0,64
Pp. EM-ALB					-0,44		-0,44
Pp. EM- Peine					-0,4		-0,4
MEI						0,54	
Área Total lagunas	0,31			0,32	1		

Fuente: Elaboración propia; Pp.: precipitación; MEI: Multivariate ENSO Index; ALB: Albemarle

Los coeficientes de correlación estimados entre evapotranspiración y los niveles freáticos de La Brava son bajos y de valor absoluto inferior a 0,50 (p-valor < 0,05), estimándose dos negativos y uno positivo, este último entre EVT-19 y TPZ-10 (Tabla 6-66).

Se obtuvieron coeficientes de correlación positivos y moderados entre evapotranspiración y superficie, en EVT-20, el coeficiente de correlación con la superficie de dilución salina es de 0,69, mientras que con la superficie lagunar total más dilución salina es de 0,64. La evapotranspiración aumenta cuando la superficie de agua posible de evaporar aumenta, lo que se estima sucede especialmente en el espejo de agua somero de la zona de dilución salina.

Por otro lado, los coeficientes de correlación entre precipitación- superficie lagunar total más dilución salina y precipitación - superficie lagunar total, son moderados y negativos, de -0,44 en EM de Albemarle y -0,40 en EM-Peine. Se debe considerar que las superficies lagunares se reducen en verano, período en que las precipitaciones se concentran.

Al realizar una correlación con MEI (índice multivariado de ENOS (Multivariate ENSO Index) se observa que hay correlación significativa de 0,54 con la superficie de dilución salina, por lo que se estima una respuesta en la superficie de agua de dilución salina ante el aumento de precipitaciones relacionado al período de El Niño.

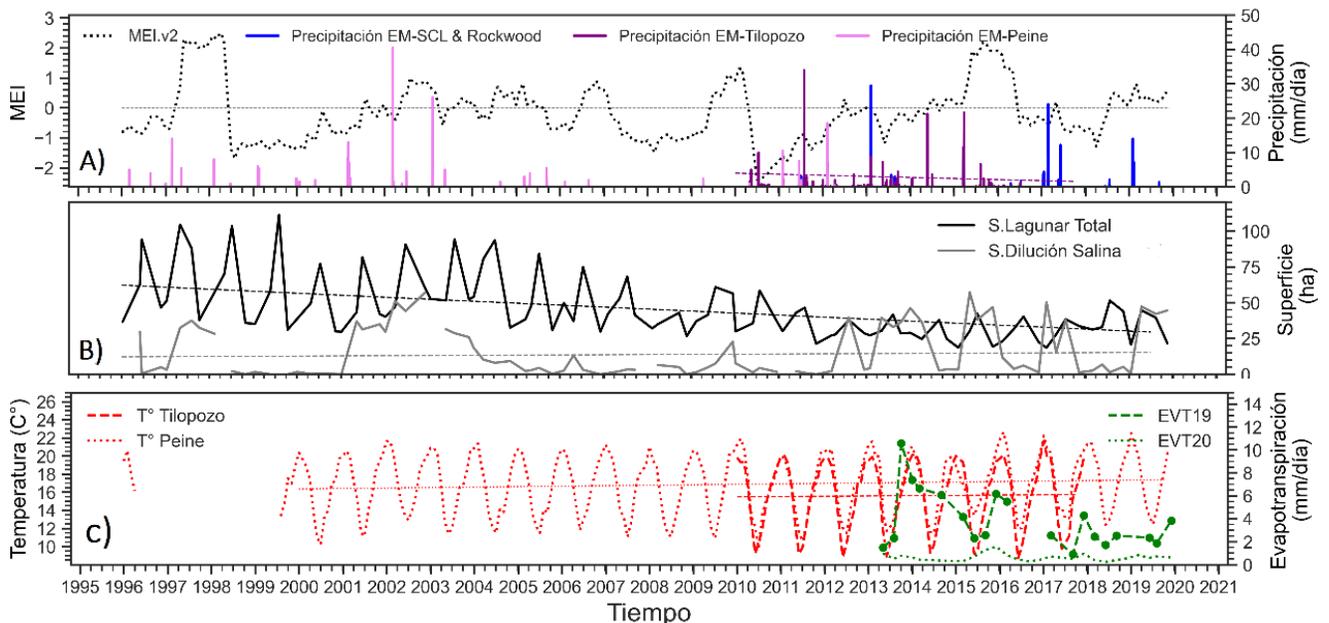


Figura 6-147 Variación temporal de (A) precipitación, (B) superficie lagunar y de dilución salina, (C) temperatura y evapotranspiración, 1996-2019. Fuente: Elaboración propia.

En la

Figura 6-147 A y B se observa el registro de datos de precipitación, MEI (Índice Multivariado de ENOS - El Niño Oscilación del Sur), superficie lagunar total, superficie de dilución salina y evapotranspiración para el período 1995–2019. Para la precipitación diaria en EM-Peine se observa un período continuo de valores inferiores a 10 mm/día durante 2003 a 2010 (

Figura 6-147 A). Por otro lado, la superficie lagunar total presenta un constante descenso, que se pronuncia entre el año 2003 y 2019. En cambio, la superficie de dilución salina presenta valores altos desde 2012 a 2019 (

Figura 6-147 B). Cuando la temperatura aumenta levemente, la evapotranspiración disminuye, lo que se observa para el período con registro de evapotranspiración (2013 a 2019) (

Figura 6-147 C).

### 6.3.2. Correlaciones variables de lagunas superficiales

A continuación, se presentan matrices de correlación de Spearman, para las cuales se utilizaron los promedios estacionales de las variables químicas medidas *in situ* y luego las variables medidas en laboratorio. Se presentan las variables agrupadas por laguna (La Brava /La Punta).

Las siguientes tablas de matrices de correlación solo muestran las correlaciones significativas ( $p$  valor < 0,05) que corresponden a los períodos respectivos indicado para cada conjunto de variables. Las celdas vacías corresponden a correlaciones no significativas y el símbolo “-“ corresponde a cruces de variables repetidos.

#### 6.3.2.1. Correlaciones de variables químicas *in situ*

Tabla 6-67 Matriz de correlación (Spearman) de parámetros químicos *in situ*, 2000-2018 (2010-2017 para salinidad),

Parámetros <i>in situ</i>		La Punta					La Brava				
		Temp	pH	OD	CE	Salinidad	Temp	pH	OD	CE	Salinidad
La Punta	Temp			-0,40	0,31	0,60	0,91	-0,44	-0,35	0,51	0,42
	pH							0,54			
	OD				-0,31		-0,37		0,62	-0,15	
	CE						0,29	-0,24	-0,33	0,39	0,35
	Salinidad				0,66					0,38	
La Brava	Temp	-	-	-	-			-0,52	-0,43	0,48	
	pH	-	-	-	-				0,39	-0,45	
	OD	-	-	-	-					-0,22	
	CE	-	-	-	-						
	Salinidad	-	-	-	-					0,56	

Fuente: Elaboración propia; Temp: temperatura de agua; OD: Oxígeno disuelto; CE: conductividad eléctrica

Las variables químicas medidas *in situ* (OD: oxígeno disuelto; CE: conductividad eléctrica; pH y salinidad) están presentadas para el período de 2000-2018 ( $n = 72$ ), con la excepción de la variable salinidad, cuyos coeficientes de correlación corresponden al análisis realizado para el período 2010-2017, donde hay disponibilidad de información. De las variables medidas en La Punta se destacan las correlaciones positivas entre salinidad-conductividad eléctrica (0,66) y salinidad-temperatura (0,60), y en menor medida, temperatura- conductividad eléctrica (0,31). El oxígeno disuelto presenta correlaciones negativas con temperatura (-0,40) y conductividad eléctrica (-0,31). Paralelamente, las variables medidas en La Brava presentan mayor cantidad de correlaciones significativas, con respecto a La Punta, de las cuales se destacan los coeficientes positivos entre salinidad-

conductividad (0,56) y temperatura-conductividad eléctrica (0,48), y así también los coeficientes negativos entre temperatura-pH (-0,52), conductividad eléctrica-pH (-0,45) y temperatura-oxígeno disuelto (-0,43).

Interesantemente, se presenta una mayor cantidad de correlaciones significativas al cruzar las variables de las dos lagunas, de las cuales se destacan los coeficientes positivos entre variables semejantes como temperatura (0,91), oxígeno disuelto (0,62), pH (0,54), y conductividad eléctrica (0,39), además de temperatura La Punta-conductividad eléctrica La Brava (0,51). No hay una correlación significativa entre la salinidad de ambas lagunas. Los coeficientes de correlación negativos entre las lagunas son todas inferiores a 0,50 (valor absoluto), de las que se contemplan temperatura La Punta-pH la Brava (-0,44), temperatura La Brava-oxígeno disuelto La Punta (-0,37) y temperatura La Punta-oxígeno disuelto La Brava (-0,35). Sin embargo, estas correlaciones entre ambas lagunas no implican mecanismos inter-lagunares a nivel superficial o subterráneo.

### 6.3.2.2. Correlaciones de variables químicas de laboratorio

Las Tablas 6-68 y 6-67 presentan los coeficientes de correlación de Spearman para las variables químicas medidas en laboratorio.

Tabla 6-68 Matriz de correlación parámetros químicos, 2000-2018

Parámetros químicos		La Punta									
		HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	STS	Alcalinidad
La Punta	HCO <sub>3</sub>				-0,26	0,53	-0,21	-0,21		0,37	
	CO <sub>3</sub>	-			0,21	-0,31		0,20			
	Cl	-	-		0,52	0,23					
	SO <sub>4</sub>	-	-	-		-0,30	0,44	0,31		-0,30	0,31
	NH <sub>4</sub>	-	-	-	-		-0,23	-0,29		0,34	
	NO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-		0,61	-0,30		
	NO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-		0,39		0,34
	PO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-			
	STS	-	-	-	-	-	-	-	-		
Alcalinidad	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
La Brava	HCO <sub>3</sub>	0,77	-0,41		-0,32	0,52	-0,37	-0,26		0,41	
	CO <sub>3</sub>	-0,61	0,56							0,25	
	Cl		0,30	0,33		0,27			-0,37	0,47	0,31
	SO <sub>4</sub>	-0,48	0,49		0,45	-0,36					
	NH <sub>4</sub>	0,46	-0,22		-0,52	0,49	-0,28	-0,26		0,30	-0,26
	NO <sub>2</sub>				0,39		0,69	0,53	-0,33	-0,26	0,27
	NO <sub>3</sub>	-0,19	0,23		0,29	-0,33	0,41	0,83	-0,41		
	PO <sub>4</sub>		0,35							0,27	
	STS	0,47			-0,42	0,42				<b>0,79</b>	
Alcalinidad						-0,38				0,42	

Parámetros químicos		La Brava									
		HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	STS	Alcalinidad
La Brava	HCO <sub>3</sub>			0,27	-0,36	0,43	-0,20	-0,26		0,50	
	CO <sub>3</sub>	-		0,64					0,50	0,47	

Cl	-	-			0,32			0,63	0,60	0,32
SO <sub>4</sub>	-	-	-		-0,26			0,43		
NH <sub>4</sub>	-	-	-	-			-0,26	0,24	0,41	
NO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-		0,46			
NO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-				
PO <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-		0,34	
STS	-	-	-	-	-	-	-	-		
Alcalinidad	-	-	-	-	-	-	-	-		

Fuente: Elaboración propia; STS: Sólidos totales suspendidos

A partir de Tabla 6-68 se puede observar que las especies químicas de La Punta presentan menos coeficientes de correlación que superan 0,50, con respecto a la Brava. Las correlaciones positivas más altas de La Punta son NO<sub>3</sub>-NO<sub>2</sub> (0,61), NH<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> (0,53) y SO<sub>4</sub>-Cl (0,52). Las correlaciones negativas no superan el valor de 0,31 (valor absoluto), que corresponde a NH<sub>4</sub>-CO<sub>3</sub>. Con respecto a las especies químicas indicadas y la alcalinidad, se evidencian valores de correlación en torno a 0,34 y 0,31, para NO<sub>3</sub> y SO<sub>4</sub>, respectivamente.

El sistema de La Brava sugiere mayor importancia en el rol de carbonatos y del nutriente ortofosfato ya que estos presentan los mayores coeficientes de correlación. Se encuentra una correlación positiva relevante entre Cl-CO<sub>3</sub> (0,61), Cl-PO<sub>4</sub> (0,63), Cl-STS (0,60), CO<sub>3</sub>-PO<sub>4</sub> (0,50) y HCO<sub>3</sub>-STS (0,50). Similar a La Punta, los coeficientes negativos no superan 0,36 (valor absoluto), correspondiente a SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>. La alcalinidad solo correlaciona significativamente con Cl (0,32).

Al cruzar estas variables para ambas lagunas, se observa que todas las variables semejantes correlacionan significativamente con la excepción de PO<sub>4</sub>. El cruce de NO<sub>3</sub> presenta el coeficiente de correlación más alto para este conjunto (0,83), seguido por STS (0,79). Entre los cruces de variables no-semejantes se destacan CO<sub>3</sub> La Brava-HCO<sub>3</sub> La Punta (-0,61), NO<sub>2</sub> La Brava-NO<sub>3</sub> La Punta (0,53), HCO<sub>3</sub> La Brava-NH<sub>4</sub> La Punta (0,52) y NH<sub>4</sub> La Brava-SO<sub>4</sub> La Punta (-0,52). Al igual que en el caso de los parámetros *in situ*, estas correlaciones no permiten vincular los mecanismos químicos de cada laguna.

Tabla 6-69 Matriz de correlación (Spearman) iones y metales, 2010-2016

Iones y metales	La Punta														
	Ca	F	Mg	K	Na	As	B	Cd	Cu	Fe	Li	Pb	Zn	STD	STS
La Punta	Ca		0,45												
	F	-												0,35	
	Mg	-	-		0,81	0,85								0,80	
	K	-	-	-		0,94					0,42			0,88	
	Na	-	-	-	-						0,47			0,91	
	As	-	-	-	-	-									
	B	-	-	-	-	-	-		0,53						
	Cd	-	-	-	-	-	-	-					0,47		
	Cu	-	-	-	-	-	-	-	-					0,54	
	Fe	-	-	-	-	-	-	-	-	-				0,54	

	Li	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Zn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	STD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	STS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
La Brava	Ca			0,38		0,41		0,46		0,44		0,44				
	F		0,72									0,45				
	Mg			0,71	0,61	0,71		0,64	0,59	0,38						0,55
	K			0,49												
	Na			0,74	0,88	0,91		0,45								0,80
Iones y metales	La Punta															
	Ca	F	Mg	K	Na	As	B	Cd	Cu	Fe	Li	Pb	Zn	STD	STS	
La Brava	As					0,44	0,55			0,53						
	B						0,74		0,50							
	Cd		0,56	0,42	0,53	0,43		0,78				0,57		0,46		
	Cu					0,32	0,48		0,63	0,74						
	Fe									0,72						
	Li						0,57				0,57					
	Pb											0,67				
	Zn								0,51	0,63			0,91			
	STD			0,72	0,80	0,88								0,84		
STS															0,77	

Iones y metales	La Brava															
	Ca	F	Mg	K	Na	As	B	Cd	Cu	Fe	Li	Pb	Zn	STD	STS	
La Brava	Ca		0,76		0,61		0,52							0,63		
	F	-														
	Mg	-	-		0,45	0,81	0,48	0,67						0,8		
	K	-	-	-		0,71								0,76		
	Na	-	-	-	-									0,93		
	As	-	-	-	-	-		0,81		0,50	0,43	0,44				
	B	-	-	-	-	-	-					0,55				
	Cd	-	-	-	-	-	-	-								
	Cu	-	-	-	-	-	-	-	-		0,55			0,50		
	Fe	-	-	-	-	-	-	-	-	-				0,47		
	Li	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	Zn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	STD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	STS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Fuente: Elaboración propia; STD: Sólidos totales disueltos; STS: Sólidos totales suspendidos

Al examinar el conjunto de variables iónicas y metálicas presentadas en Tabla 6-69, se observa que no hay correlaciones negativas y que los coeficientes son en promedio más elevados que los otros coeficientes observados en esta sección.

Los coeficientes de correlación de especies metálicas más altos en La Punta son Na-K (0,94), Na-Mg (0,85) y Mg-K (0,81). Con respecto a los sólidos totales disueltos, son Na, K, Mg y F las especies que correlacionan significativamente con esta variable.

Con respecto a La Brava, los coeficientes de correlación de especies metálicas más altos son B-As (0,81), Na-Mg (0,81) y Mg-Ca (0,76). Con respecto a los sólidos totales disueltos, son Na, K, Mg y Ca las especies que correlacionan significativamente con esta variable. El análisis de correlación para el cruce de estas variables entre las dos lagunas muestra una correlación significativa de todas las especies semejantes con la excepción de K y Ca.

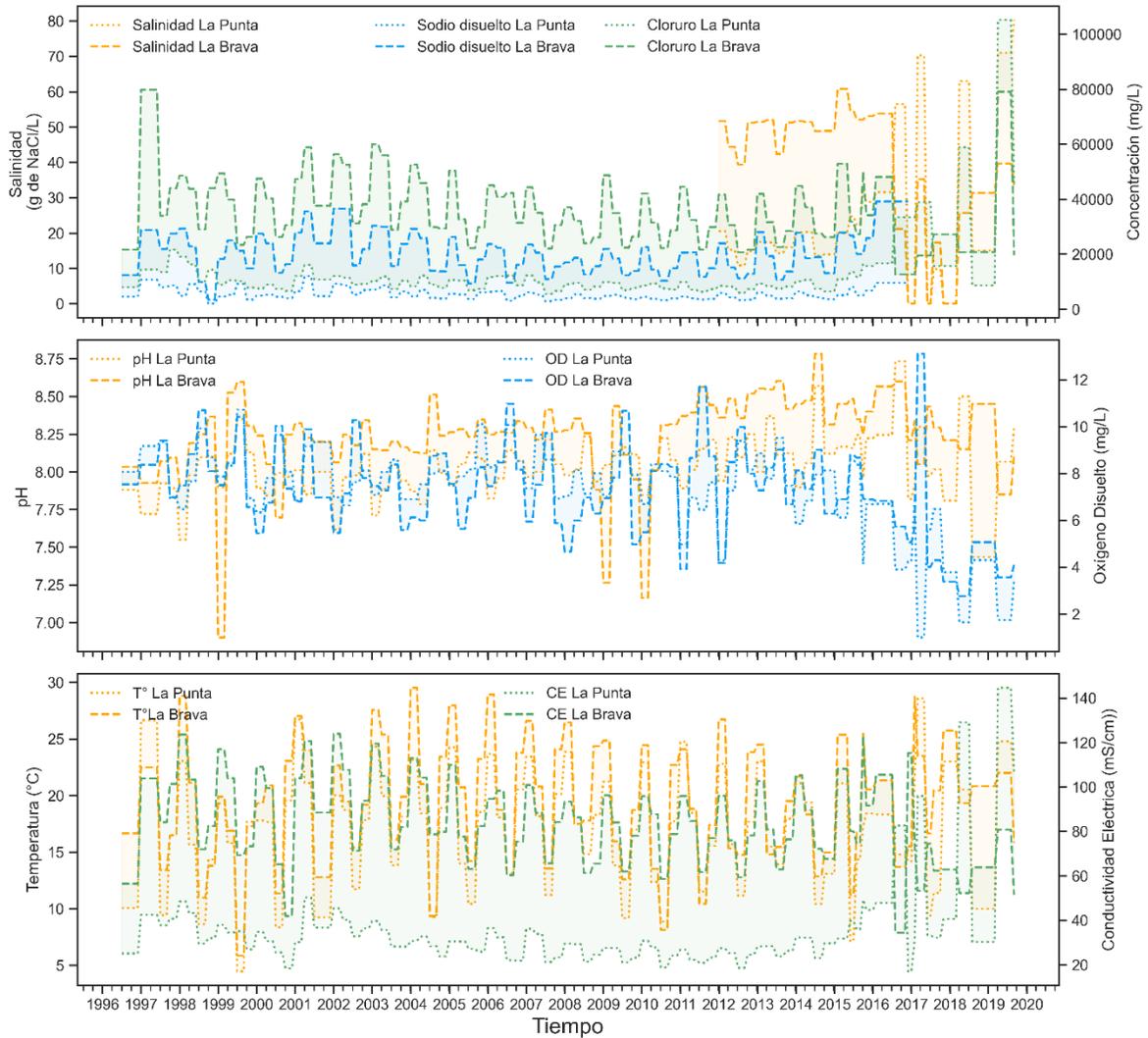


Figura 6-148 Variación temporal de (A) salinidad, sodio y cloruro (B) pH y oxígeno disuelto, (C) temperatura y conductividad eléctrica, 1996-2019. Fuente: Elaboración propia

Figura 6-149 permite visualizar la evolución conjunta del sistema entre 1996 y 2019, y hace énfasis en las variables que tendrían mayor relación con la salinidad, además de variables que podrían ser afectadas ante fluctuaciones de esta variable, como el pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica.

Lo primero que se puede observar, es que los valores para todas las variables expuestas son al principio mayores para La Brava, pero que consecuentemente, a partir de 2016/2017, los valores de La Punta se tornan mayores con una tendencia de incremento, exceptuando al oxígeno disuelto que disminuye. Segundo, en general las variables aquí expuestas fluctúan en fase con la estacionalidad, que es mejor explicitado por la temperatura y su estrecha correspondencia con la conductividad eléctrica. Se podría argumentar, no obstante, que el pH y oxígeno disuelto sostienen un desarrollo en anti-fase con salinidad, temperatura, y conductividad eléctrica, ya que ambas presentan una correlación negativa significativa con temperatura. Finalmente, cabe notar que, con respecto a salinidad, temperatura y conductividad eléctrica, éstas presentan valores elevados entre 1997 y 1998, luego un leve descenso entre 1998 y 2001, para luego tender a incrementar hasta 2006, cuando vuelven a descender, para finalmente presentar una mayor amplitud de oscilación con tendencia a incremento luego de 2016/2017.

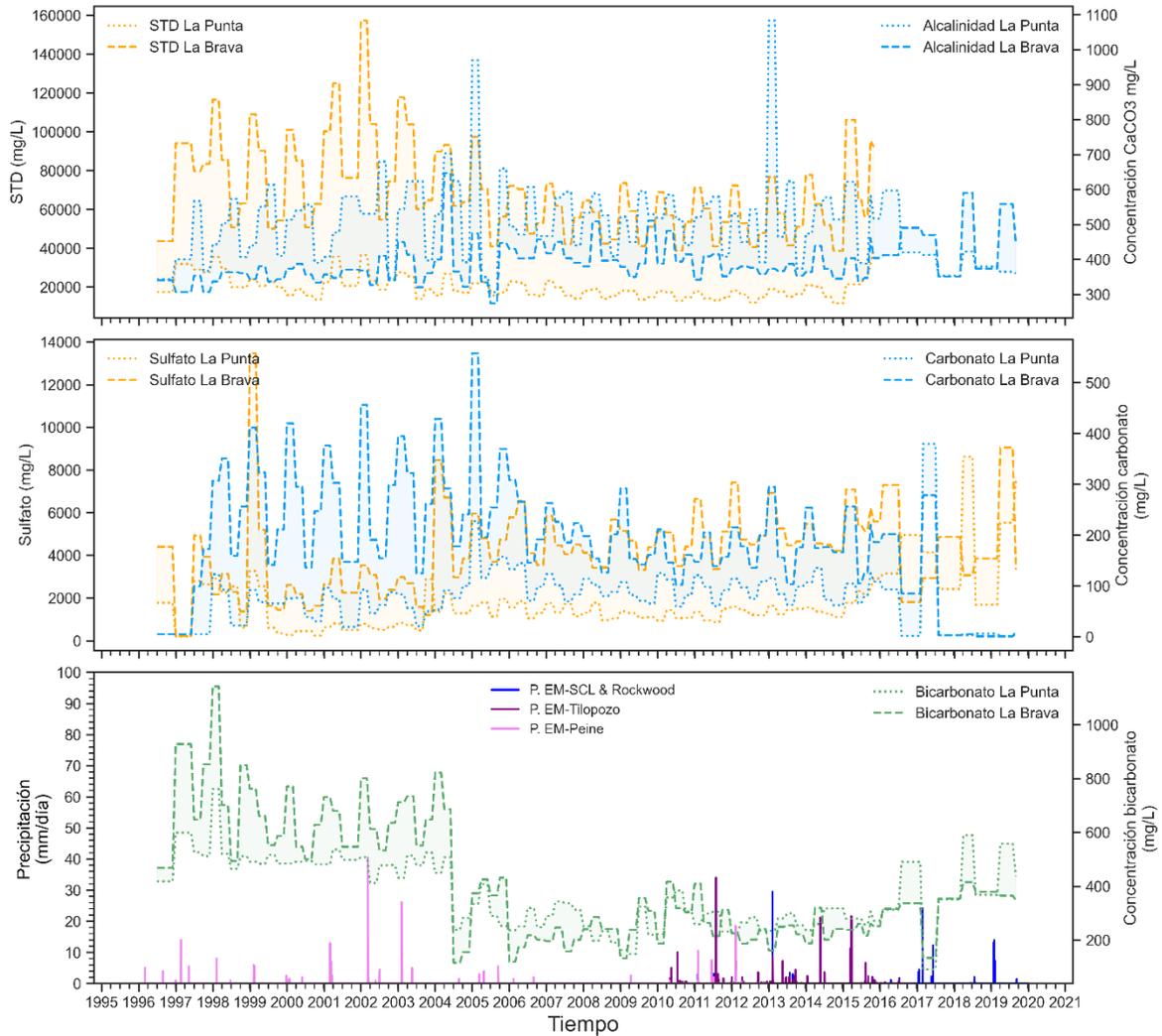


Figura 6-149 Variación temporal de (A) sólidos totales disueltos y alcalinidad (B) sulfato y carbonato, (C) precipitación y bicarbonato, 1996-2019. Fuente: Elaboración propia

Similar a lo anterior, Figura 6-149 conjuga las series temporales de variables relacionados con sólidos totales disueltos, carbonatos y sulfatos. Compatible con lo observado anteriormente, las variables acá expuestas también tienden a ser mayores para La Brava, aunque con la clara distinción de la variable alcalinidad, cuyos valores son mayores para La Punta. Interesantemente, la alcalinidad también presenta la yuxtaposición compartida por el resto de variables en 2016/2017, pero en un sentido inverso, donde los valores de La Brava superan a La Punta en el último tramo de la serie. Es posible apreciar en estas variables una coevolución en fase con la estacionalidad. Lo más notable de este conjunto de series es la progresiva (abrupta en el caso de bicarbonato) disminución de concentración en torno a 2004-2006 hacia adelante. Esto coincide con la

disminución en la tasa de precipitaciones entre 2004 y 2010. A partir de 2010 algunas concentraciones tienden a aumentar levemente en concordancia con precipitaciones más frecuentes e intensas. El análisis de correlación de Spearman para el período 2000-2018 revela que las precipitaciones de EM-Rockwood/SCL correlacionan significativamente con CO<sub>3</sub> La Punta (0,26) y La Brava (0,22), y cloruro La Punta (0,22), mientras que precipitaciones de EM-Peine correlaciona significativamente con CO<sub>3</sub> La Punta (0,28) y La Brava (0,27), y Cloruro La Brava (0,28).

### 6.3.2.3. Correlaciones de variables biológicas

La Tabla 6-70 presenta los coeficientes de correlación de Spearman para las variables biológicas.

Tabla 6-70 Matriz de correlación Biótico, 2014-2019

Variables Bióticas			La Punta					
			Fitobentos			Fitoplancton		
			Densidad	Diversidad	Riqueza	Densidad	Diversidad	Riqueza
La Punta	Fitobentos	Densidad						-0,17
		Diversidad	-				-0,78	-0,53
		Riqueza	-	-				
	Fitoplancton	Densidad	-	-	-	-		
		Diversidad	-	-	-	-		-0,77
		Riqueza	-	-	-	-	-	
	Zoobentos	Densidad						
		Diversidad						
		Riqueza						
	Zooplancton	Densidad						
		Diversidad						
		Riqueza						

Variables Bióticas			La Punta					
			Zoobentos			Zooplancton		
			Densidad	Diversidad	Riqueza	Densidad	Diversidad	Riqueza
La Punta	Fitobentos	Densidad						
		Diversidad	-0,53					
		Riqueza						
	Fitoplancton	Densidad				-0,47	-0,43	
		Diversidad	-0,83		-0,70	-0,71	-0,74	
		Riqueza	-0,81			-0,72	-	
	Zoobentos	Densidad			-0,53	-0,80	-0,73	
		Diversidad	-					
		Riqueza	-	-				
	Zooplancton	Densidad	-	-	-			
		Diversidad	-	-	-			-0,83
		Riqueza	-	-	-			

Variables Bióticas			La Brava					
			Fitobentos			Fitoplancton		
			Densidad	Diversidad	Riqueza	Densidad	Diversidad	Riqueza
	Fitobentos	Densidad					0,25	0,37

La Brava		Diversidad	-		0,36		0,82	0,54
		Riqueza	-	-			0,4	0,54
	Fitoplancton	Densidad	-	-	-			
		Diversidad	-	-	-	-		0,50
		Riqueza	-	-	-	-	-	
	Zoobentos	Densidad						
		Diversidad						
		Riqueza						
	Zooplancton	Densidad						
		Diversidad						
Riqueza								

Variables Bióticas			La Brava					
			Zoobentos			Zooplancton		
			Densidad	Diversidad	Riqueza	Densidad	Diversidad	Riqueza
La Brava	Fitobentos	Densidad			-0,23		0,64	0,63
		Diversidad	0,58		-0,74		0,15	
		Riqueza						
	Fitoplancton	Densidad						-0,53
		Diversidad		0,41	-0,57		0,17	
		Riqueza	0,62					
	Zoobentos	Densidad			-0,58	-0,15		
		Diversidad	-					
		Riqueza	-	-		0,55	-0,52	
	Zooplancton	Densidad	-	-	-		-0,63	
		Diversidad	-	-	-	-		
		Riqueza	-	-	-	-	-	

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 6-70 contiene los coeficientes de correlación para las variables bióticas analizadas. Con respecto a la microflora de La Punta, se evidencia que hay una correlación negativa entre la diversidad de fitobentos-diversidad fitoplancton (-0,78) y diversidad fitobentos-riqueza fitoplancton (-0,53). Similarmente, la diversidad fitobentos correlaciona negativamente con densidad de zoobentos (-0,53). La diversidad fitoplancton correlaciona negativamente con densidad zoobentos (-0,80), riqueza zoobentos (-0,70), diversidad (-0,71) y riqueza (-0,74) de zooplancton. La riqueza de fitoplancton muestra una relación similar con estas variables. Con respecto al zoobentos y zooplancton de La Punta, se destaca que la densidad de zoobentos correlaciona negativamente con la diversidad (-0,80) y riqueza (-0,73) de zooplancton.

Contrastando con lo anterior, la microflora de La Brava muestra correlaciones positivas, de las que se destacan diversidad fitobentos-diversidad fitoplancton (0,82) y riqueza fitobentos-riqueza fitoplancton (0,54). Esto se extiende incluso a correlaciones positivas entre el fitobentos/fitoplancton con la densidad de zoobentos. Cabe notar que existe una correlación negativa entre la diversidad de fitobentos-riqueza de zoobentos (-0,74). Con respecto al zoobentos y zooplancton, se aprecia una correlación negativa entre riqueza zoobentos-diversidad zooplancton (-0,52) y una correlación positiva entre riqueza zoobentos-densidad zooplancton (0,55).

Algunas variables que son importantes para considerar en la dinámica biótica debido a un considerable número de correlaciones con coeficientes >0,50, son la salinidad, clorofila a, oxígeno disuelto y alcalinidad.

Tabla 6-71 Matriz de correlación Biótico-variables ambientales, 2014-2019

Variables bióticas			La Punta				
			Temp	Salinidad	Alcal.	Clorofila a	OD
ta	Fitobentos	Densidad					
		Diversidad			-0,49	-0,47	0,53
		Riqueza			-0,53		
	Fitoplancton	Densidad		-0,49		0,45	0,21
		Diversidad				-0,59	0,61
		Riqueza				-0,57	0,71
	Zoobentos	Densidad				-0,62	0,75
		Diversidad					
		Riqueza		-0,51			
	Zooplancton	Densidad	0,44				
		Diversidad		-0,37		0,83	
		Riqueza		0,61		0,53	
Variables bióticas			La Brava				
			Temp	Salinidad	Alcal.	Clorofila a	OD
La Brava	Fitobentos	Densidad			0,32	-0,64	0,27
		Diversidad		0,57			
		Riqueza					
	Fitoplancton	Densidad				0,59	
		Diversidad		0,45			0,61
		Riqueza		0,73		-0,59	0,66
	Zoobentos	Densidad					
		Diversidad			0,30		
		Riqueza		-0,66	-0,62	0,75	
	Zooplancton	Densidad		-0,45	-0,40	0,53	
		Diversidad		0,41		-0,85	
		Riqueza				-0,56	

Fuente: Elaboración propia; Temp: Temperatura de agua; Alcal.: Alcalinidad; OD: Oxígeno disuelto

Al correlacionar variables abióticas con la biológicas (Tabla 6-71) se encuentra que, en términos generales, i). temperatura de las lagunas solo correlaciona con densidad de zooplancton en La Punta (0,44), ii). la riqueza de zoobentos de ambas lagunas correlaciona negativamente con la salinidad, iii). la clorofila a presenta numerosas correlaciones con coeficientes altos en ambas lagunas, y iv). el oxígeno disuelto también presenta numerosas correlaciones, similar a las presentes para clorofila a, pero en el sentido opuesto (negativo/positivo).

En términos específicos, y con respecto a la biota de La Punta, notamos que los coeficientes más altos y positivos están presentes para las relaciones diversidad zooplancton-clorofila a (0,83), densidad zoobentos-

oxígeno disuelto (0,75), riqueza fitoplancton-oxígeno disuelto (0,71) y riqueza de zooplancton-salinidad (0,61). Las correlaciones negativas más relevantes son densidad de zoobentos-clorofila *a* (-0,62), diversidad fitoplancton-clorofila *a* (-0,59), riqueza de fitobentos-alcalinidad (-0,53) y riqueza de zoobentos-salinidad (-0,51).

Con respecto a la laguna La Brava, las correlaciones positivas más relevantes son riqueza de zoobentos-clorofila *a* (0,75), riqueza de fitoplancton-salinidad (0,73), riqueza fitoplancton-oxígeno disuelto (0,66), y diversidad fitoplancton-oxígeno disuelto (0,61). Luego, las correlaciones negativas más relevantes para esta laguna son diversidad zooplancton-clorofila *a* (-0,85), riqueza zoobentos-salinidad (-0,66), densidad fitobentos-clorofila *a* (-0,64) y riqueza zoobentos-alcalinidad (-0,62).

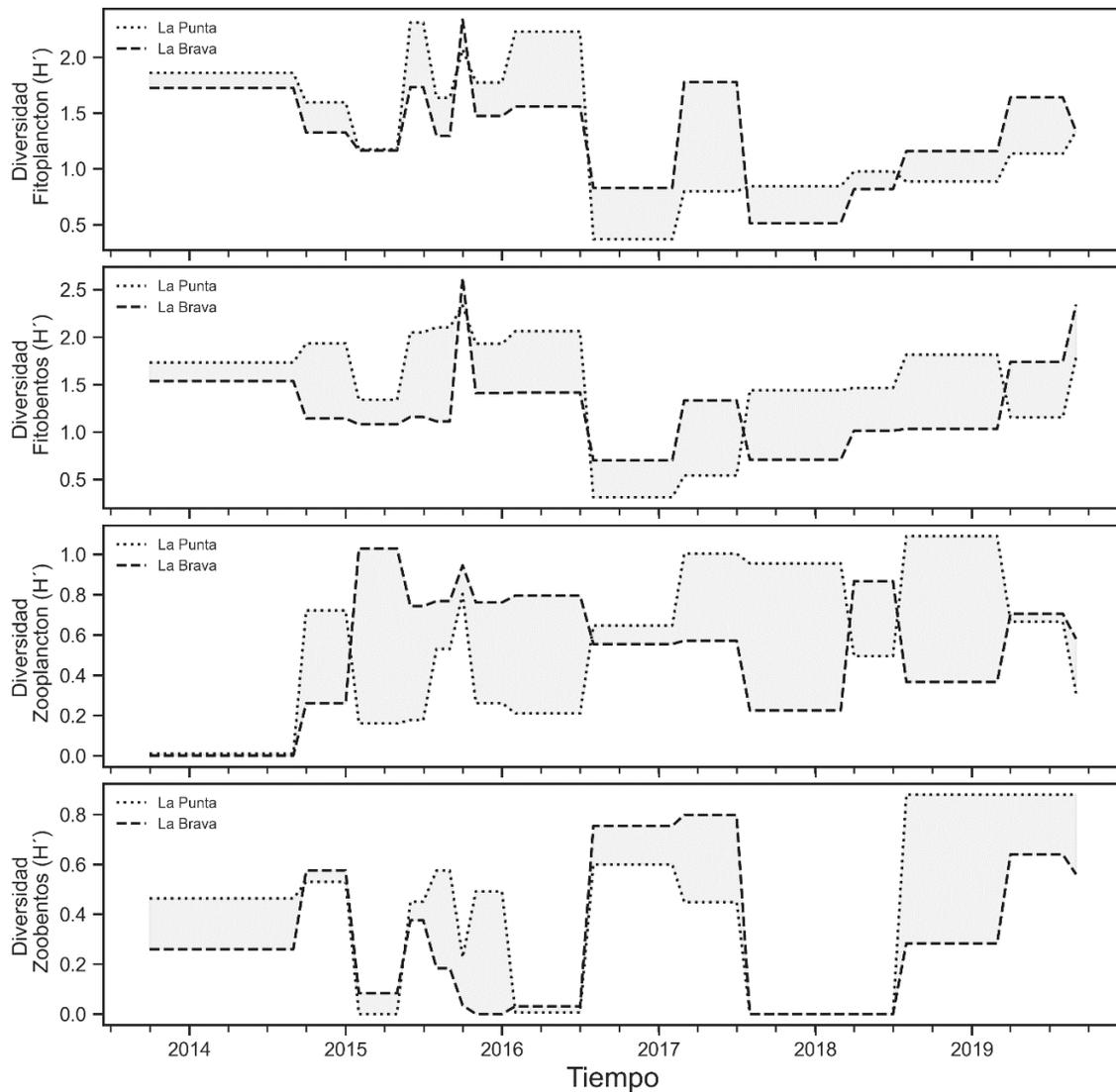
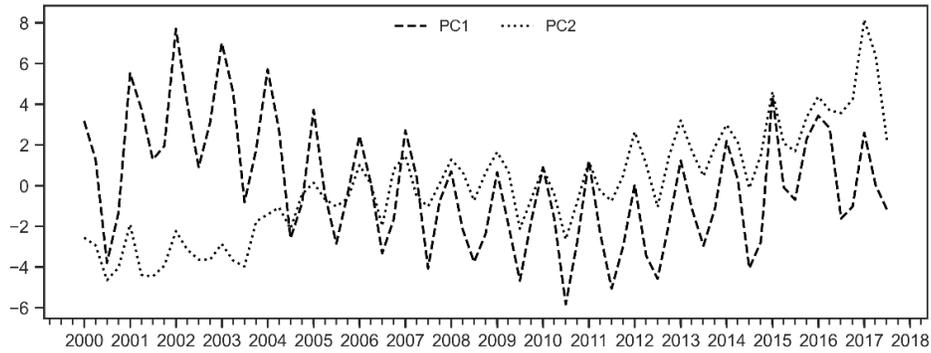


Figura 6-150 Variación temporal de (A) diversidad fitoplancton (B) diversidad fitobentos, (C) diversidad zooplancton, (D) diversidad zoobentos 2014-2020. Fuente: Elaboración propia; Diversidad: índice de Shannon

A partir de Figura 6-150 se puede apreciar la complejidad de fluctuaciones en la diversidad de la biota de La Punta La Brava para el período 2014-2020. No obstante, es posible notar ciertos hitos que se comparten entre las series. Las series de fitoplancton y fitobentos sugieren una disminución de diversidad a partir de mediados de 2016, con una paulatina recuperación hacia 2020. Esto coincide con la serie de diversidad de zooplancton de La Brava pero no con la serie de La Punta que sostiene una tendencia de aumento. Las series de diversidad de zoobentos muestran amplias fluctuaciones entre valores cercanos a 0 y 0,8 (índice de Shannon). Cabe notar que la diversidad de fitobentos aumenta en el último año de la serie.

#### **6.3.2.4. Análisis multivariado del sistema lagunar**

En esta sección se presenta un análisis multivariado mediante un análisis de componentes principales (ACP) con el fin de integrar las variables analizadas y correlacionadas a lo largo de este informe, y para reducir, o resumir, la dimensionalidad del sistema. Se presentan dos análisis para dos períodos, ya que las variables biológicas están acotadas entre el período 2014-2019.



Análisis de componentes principales LPLB 2000-2017

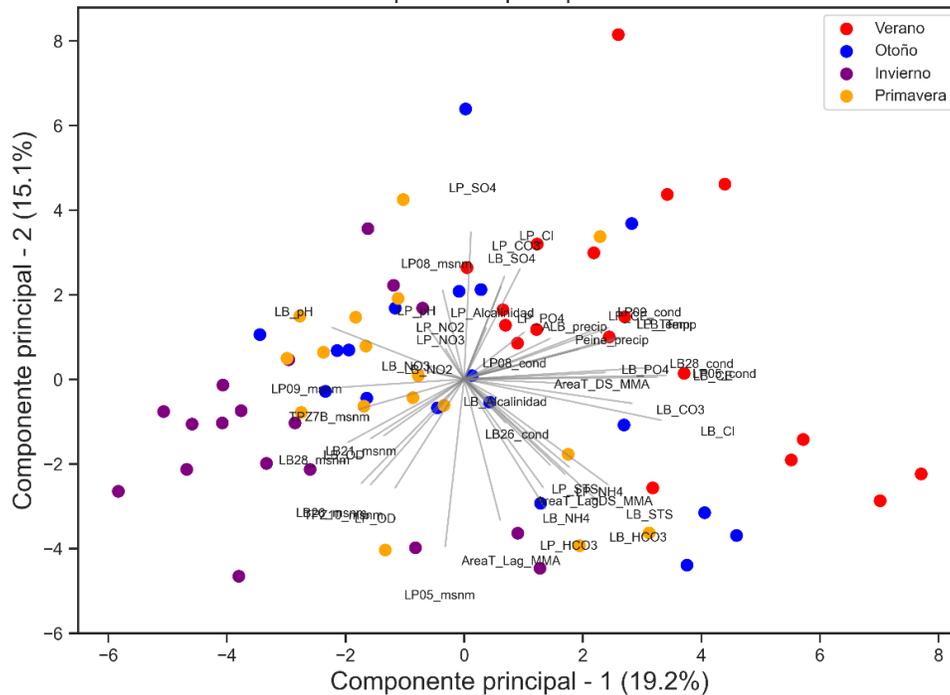


Figura 6-151 ACP 2000-2017, (A) serie temporal de componentes principales, (B) biplot de ACP. Fuente: Elaboración propia; LP05\_cond: conductividad en LP-05; LB28\_cond: conductividad en LB-28; LP09\_cond: conductividad en LP-09; LB26\_cond: conductividad en LB-26; LP08\_cond: conductividad en LP-08; LB21\_cond: conductividad en LB-21; LB28\_msnm: nivel freático en LB-28; TPZ7B\_msnm: nivel freático en TPZ-7B; LB26\_msnm: nivel freático en LB-26; TPZ10\_msnm: nivel freático en TPZ-10; LB21\_msnm: nivel freático en LB-21; LP09\_msnm: nivel lagunar en LP-09; LP05\_msnm: nivel lagunar en LP-05; LP08\_msnm: nivel lagunar en LP-08; LB\_Temp: temperatura de agua en La Brava; LB\_OD: oxígeno disuelto en La Brava; LP\_OD: oxígeno disuelto en La Punta; LB\_pH: pH en la Brava; LP\_pH: pH en la Punta; LB\_CE: conductividad en La Brava; LP\_CE: conductividad en La Punta; LB\_Cl: cloruro en La Brava; LP\_Cl: cloruro en La Punta; LB\_CO3: carbonato en La Brava; LP\_CO3: carbonato en La Punta; LB\_HCO3: bicarbonato en La Brava; LP\_HCO3: bicarbonato en La Punta; LB\_NH4: amonio en La Brava; LP\_NH4: amonio en La Punta; LB\_PO4: ortofosfato en La Brava; LP\_PO4: ortofosfato en La Punta; LB\_SO4: sulfato en La Brava; LP\_SO4: sulfato en La Punta; LB\_STS: sólidos totales suspendidos en La Brava; LP\_STS: sólidos totales suspendidos; LB\_NO3: nitrato en La Brava; LP\_NO3: nitrato en La Punta; LB\_NO2: nitrito en La Brava; LP\_NO2: nitrito en La Punta; LB\_Alcalinidad: alcalinidad en La Brava; LP\_Alcalinidad: alcalinidad en La Punta; AreaT\_LagDS\_MMA: superficie total de laguna y zona de dilución salina; AreaT\_DS\_MMA: superficie total de zona de dilución salina; ALB\_precip: precipitación medido en EM-SCL/Rockwood; Peine\_precip: precipitación medido en EM-Peine

El ACP realizado a partir de las variables disponibles para el período 2000-2017 (n=47 variables; Figura 6-151; ver nota al pie de la figura para variables consideradas) logra explicar 34.3% de la varianza total encontrada en el conjunto de datos entre los primeros dos componentes principales. Si bien éste es un valor bajo, se debe considerar que el sistema analizado es altamente estocástico con respecto al régimen de precipitaciones, lo cual podría estar generando respuestas no-lineales en los componentes del sistema, y así una alta varianza,

complejo de reducir a partir de este análisis. No obstante, se observa que el primer componente principal (19.2% de la varianza) separa exitosamente las estaciones del año más contrastantes, y en conjunto con el segundo componente principal (15.1% de la varianza), termina segregando las observaciones de invierno hacia valores negativos en ambos ejes, y las observaciones de verano hacia valores positivos en ambos ejes. Es cierto que la dispersión en ambos casos resulta en algunas observaciones de invierno en valores positivos, y así también observaciones estivales en valores negativos, pero esto no es problemático ya que no se solapan estos dos grupos de observaciones en ninguna región del espacio bidimensional. Así se puede asociar la tendencia general recién mencionada con el valor propio de cada variable según su orientación en el plano.

Dicho esto, es posible reconocer cuatro asociaciones de variables. El primero consta de valores negativos asociados a observaciones de invierno y corresponde a mayor nivel lagunar, nivel freático y oxígeno disuelto. El grupo de variables opuesto al primero se asocia con observaciones de verano y consta de mayor conductividad, temperatura, precipitación, superficie de dilución salina, concentración de carbonato (La Brava), y ion cloruro (La Brava). Un tercer grupo con estrecha asociación hacia valores positivos del primer componente principal y valores negativos del segundo componente principal, agrupa a variables tales como superficie lagunar total, concentración de bicarbonato, sólidos totales suspendidos y concentración de amonio. Finalmente, el cuarto grupo de variables presenta mayor dispersión que el grupo anterior, pero se concentra en torno a valores neutrales en el primer componente principal y valores positivos en el segundo componente. Este grupo contempla las variables sulfato, cloruro y carbonato de La Punta, nivel lagunar LP-08, nitratos y nitritos y alcalinidad de La Punta.

Lo anterior sugiere que el primer componente principal está siendo influenciado por procesos relacionados con fluctuaciones en temperatura y evapotranspiración. El segundo componente llega a ser más complejo de descifrar ya que solo explica un 15.1% de la varianza y separa variables sin una relación directa. La concentración de sulfato de La Punta tiene la mayor ponderación en el segundo componente (4,36) en el sentido positivo, mientras que nivel lagunar medido en LP-05 presenta la mayor ponderación en el sentido negativo (-4,88).

El cuadro superior de Figura 6-151 muestra las series temporales de los dos primeros componentes principales. La serie del primer componente muestra una marcada fluctuación multi-anual a decadal donde luego de alcanzar valores positivos y altos entre 2001 y 2004, traspasa hacia valores negativos con tendencia al descenso hasta alcanzar un mínimo en torno al año 2010. Luego comienza a ascender hacia valores positivos hasta 2015, cuando vuelve a descender moderadamente. La serie del segundo componente muestra una

sostenida tendencia de aumento, con mínimos entre 2000 y 2004, y un pronunciado máximo en 2017. Esto es indicativo de una tendencia sostenida en el sistema superpuesta a fluctuaciones semi-decadales.

Para analizar la contribución de las variables biológicas en el sistema se analiza el período de 2014-2018 de la misma forma.

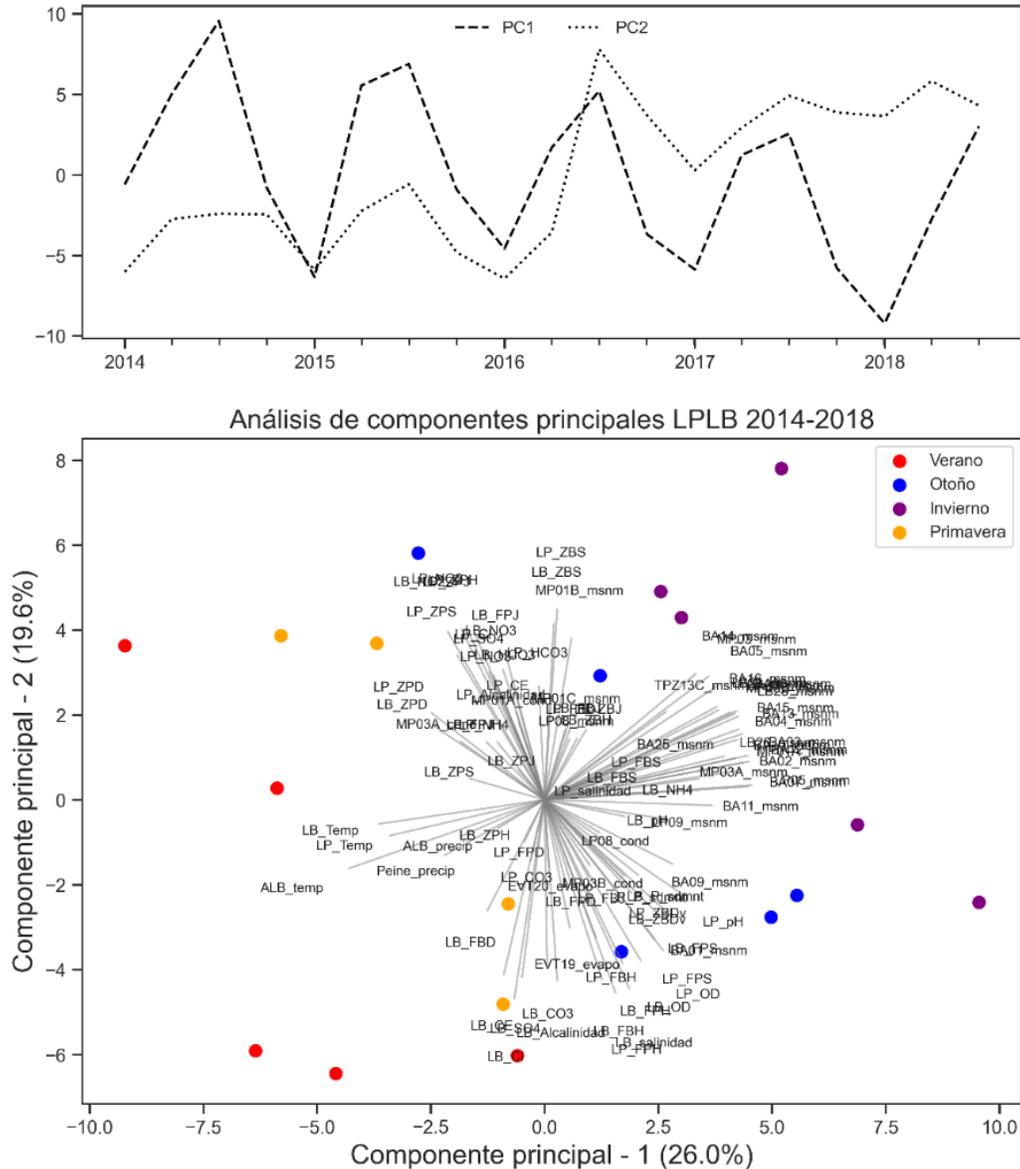


Figura 6-152 ACP 2014-2018, (A) serie temporal de componentes principales, (B) biplot de ACP. Fuente: Elaboración propia; LP08\_cond: conductividad en LP-08; MP01A\_cond: conductividad en MP-01A; MP03A\_cond: conductividad en MP-03A; MP03B\_cond: conductividad en MP-03B; LB28\_msnm: nivel freático en LB-28; LB26\_msnm: nivel freático en LB-26; LB21\_msnm: nivel freático en LB-21; LP09\_msnm: nivel lagunar en LP-09; LP05\_msnm: nivel lagunar en LP-05; LP08\_msnm: nivel lagunar en LP-08; MP01B\_msnm: nivel freático en MP-01B; BA14\_msnm: nivel freático en BA-14; BA05\_msnm: nivel freático en BA-05; BA16\_msnm: nivel freático en BA-16; BA06\_msnm: nivel freático en BA-06; TPZ13C\_msnm: nivel freático en TPZ-13C; BA08\_msnm: nivel freático en BA-08; MP03C\_msnm: nivel freático en MP03C; MP01C\_msnm: nivel freático en MP-01C; BA15\_msnm: nivel freático en BA-15; BA13\_msnm: nivel freático en BA-13; BA04\_msnm: nivel freático en BA-04; BA03\_msnm: nivel freático en BA-03; BA25\_msnm: nivel freático en BA-25; BA10\_msnm: nivel freático en BA-10; BA12\_msnm: nivel freático en BA-12; MP01A\_msnm: nivel freático en MP-01A; BA02\_msnm: nivel freático en BA-02; MP03A\_msnm: nivel freático en MP-03A; BA07\_msnm: nivel freático en BA-07; BA11\_msnm: nivel freático en BA-11; BA09\_msnm: nivel freático en BA-09; BA01\_msnm: nivel freático en BA-01; LB\_Temp: temperatura de agua en La Brava; LP\_Temp: temperatura de agua en La

Punta; **LB\_OD**: oxígeno disuelto en La Brava; **LP\_OD**: oxígeno disuelto en La Punta; **LB\_pH**: pH en La Brava; **LP\_pH**: pH en La Punta; **LB\_CE**: conductividad en La Brava; **LP\_CE**: conductividad en La Punta; **LB\_Cl**: cloruro en La Brava; **LP\_Cl**: cloruro en La Punta; **LB\_CO3**: carbonato en La Brava; **LP\_CO3**: carbonato en La Punta; **LB\_HCO3**: bicarbonato en La Brava; **LP\_HCO3**: bicarbonato en La Punta; **LB\_NH4**: amonio en La Brava; **LP\_NH4**: amonio en La Punta; **LB\_PO4**: ortofosfato en La Brava; **LP\_PO4**: ortofosfato en La Punta; **LB\_SO4**: sulfato en La Brava; **LP\_SO4**: sulfato en La Punta; **LB\_STS**: sólidos totales suspendidos en La Brava; **LP\_STS**: sólidos totales suspendidos; **LB\_NO3**: nitrato en La Brava; **LP\_NO3**: nitrato en La Punta; **LB\_NO2**: nitrito en La Brava; **LP\_NO2**: nitrito en La Punta; **LB\_Alcalinidad**: alcalinidad en La Brava; **LP\_Alcalinidad**: alcalinidad en La Punta; **AreaT\_LagDS\_MMA**: superficie total de laguna y zona de dilución salina; **AreaT\_DS\_MMA**: superficie total de zona de dilución salina; **ALB\_precip**: precipitación medido en EM-SCL/Rockwood; **Peine\_precip**: precipitación medido en EM-Peine; **ALB\_temp**: temperatura medido en EM-SCL/Rockwood; **EVT20\_evapo**: evapotranspiración en EVT-20; **EVT19\_evapo**: evapotranspiración en EVT-19; **LB\_salinidad**: salinidad de La Brava; **LP\_salinidad**: salinidad de La Punta; **LB\_P\_sdmnt**: fósforo en sedimento La Brava; **LP\_P\_sdmnt**: fósforo en sedimento La Punta; **LB\_FBD**: Densidad de fitobentos en La Brava; **LP\_FBD**: Densidad de fitobentos en La Punta; **LB\_FBS**: riqueza de fitobentos en La Brava; **LP\_FBS**: riqueza de fitobentos en La Punta; **LB\_FBH**: diversidad de fitobentos en La Brava; **LP\_FBH**: diversidad de fitobentos en La Punta; **LB\_FPD**: Densidad de fitoplancton en La Brava; **LP\_FPD**: Densidad de fitoplancton en La Punta; **LB\_FPS**: riqueza de fitoplancton en La Brava; **LP\_FPS**: riqueza de fitoplancton en La Punta; **LB\_FPH**: diversidad de fitoplancton en La Brava; **LP\_FPH**: diversidad de fitoplancton en La Punta; **LB\_ZBD**: densidad de zoobentos en La Brava; **LP\_ZBD**: densidad de zoobentos en La Punta; **LB\_ZBS**: riqueza de zoobentos en La Brava; **LP\_ZBS**: riqueza de zoobentos en La Punta; **LB\_ZBH**: diversidad de zoobentos en La Brava; **LP\_ZBH**: diversidad de zoobentos en La Punta; **LB\_ZPD**: densidad de zooplancton en La Brava; **LP\_ZPD**: densidad de zooplancton en La Punta; **LB\_ZPS**: riqueza de zooplancton en La Brava; **LP\_ZPS**: riqueza de zooplancton en La Punta; **LB\_ZPH**: diversidad de zooplancton en La Brava; **LP\_ZPH**: diversidad de zooplancton en La Punta

El ACP ilustrado en Figura 6-152 se realizó con mayor cantidad de variables (n=88 variables), pero por otro lado contempla menor cantidad de observaciones que el análisis anterior. No obstante, este análisis logra explicar una mayor cantidad de la varianza total (45.6%) entre los dos primeros componentes, y sumado a esto, segrega las cuatro estaciones del año con más eficacia. La lógica para el primer componente es semejante al análisis anterior, aunque en esta ocasión las observaciones de verano se encuentran en valores negativos y los de invierno en valores positivos.

A grandes rasgos, se mantienen los cuatro grupos de variables, con la diferencia de que la conductancia presenta mayor dispersión, y que las variables biológicas se distribuyen ampliamente a lo largo del segundo componente principal. Mirando solo los valores propios de densidad de las variables biológicas, se encuentra que el zooplancton de ambas lagunas y fitobentos de La Punta se asocian a valores positivos, mientras que fitobentos de La Brava, zoobentos y fitoplancton (ambas lagunas) se asocian a valores negativos. Eso en conjunto con la presencia de oxígeno disuelto en torno a valores negativos, lleva a postular que el desarrollo biológico se asocia en general a valores negativos del segundo componente principal.

Con esto en mente, se analiza las series temporales ilustrados en el cuadrante superior de la Figura 6-152, donde se observa una tendencia de descenso para el primer componente hacia valores negativos (estivales), y una marcada transición desde valores negativos hacia valores positivos a mediados de 2016, para el segundo componente principal. Esto sugiere un aumento de condiciones tipo-verano y disbióticas en los años más recientes.

Finalmente, como parte del análisis multivariado, se realizó un Análisis de Correspondencia Canónica (CCA), para profundizar en la dinámica biológica en relación a cambios físicoquímicos de las lagunas. En este sentido, las variables biológicas se entenderían como variables respuesta.



La Figura 6-153 muestra el resultado del CCA para el período 2014-2018, donde se observa una correspondencia de  $r=0,150$  ( $r = 1 - \frac{\text{suma residual de cuadrados}}{\text{suma total de cuadrados}}$ ) entre las variables forzantes (abiótico n=66 variables) y las respuestas (biótico n=22 variables). Este coeficiente de correspondencia sugiere que, si bien algunas variables biológicas se asocian y correlacionan con algunas variables abióticas, la respuesta de estas variables ante cambios en el sistema no es continuo ni lineal en el tiempo, de modo que la regresión de mínimos cuadrados realizada en este análisis presenta una alta cantidad de residuos.

El primer componente está fuertemente influenciado por el invierno 2016, ya que éste presenta la mayor ponderación hacia valores positivos (4.66). Esto coincide con el abrupto cambio de valores (negativo a positivo) del segundo componente del ACP realizado para el mismo período (Figura 6-152). Interesantemente, son variables correspondientes a organismos bentónicos los que se asocian a valores positivos en este primer eje.

El segundo componente, al igual que los primeros componentes de los ACPs, se relaciona con la dinámica mediada por fluctuaciones de temperatura, donde se observa la segregación de observaciones de invierno y otoño hacia valores positivos, y observaciones de primavera y verano hacia valores negativos. Este eje separa el zoobentos (positivo) del zooplancton (negativo), y así también concentra las variables de la microflora en valores positivos. A partir de esto, es posible postular que tanto la densidad, diversidad y riqueza del fitobentos y fitoplancton se ven favorecidos por condiciones “invernales”, o de mayor nivel agua, mientras que condiciones tipo-verano favorece la densidad, diversidad y riqueza del zooplancton. Las variables del zoobentos oscilan entre valores neutrales y fuertemente positivos.

#### **6.4. Definición de condiciones operacionales de referencia y estado de salud de las lagunas La Punta y La Brava.**

El estado de salud de los sistemas hipersalinos es difícil de determinar porque por definición poseen condiciones extremas tanto físicas, fisicoquímicas como comunidades adaptadas a estas condiciones, los extremófilos. Además, la alta complejidad y variabilidad en la geología e hidrogeología de los distintos salares genera diferentes ecosistemas incluso al interior de cada laguna. En el caso de las variables fisicoquímicas las normas de calidad son difíciles de aplicar producto de los mismos rangos en que varían los distintos parámetros y, si bien es de interés ambiental fijar rangos, se dificulta aún más en la práctica dadas las condiciones climáticas cambiantes de las últimas décadas.

En el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental se utilizan como referencia las condiciones diagnosticadas en la línea de base de los proyectos, condiciones que en un mismo sistema cambian en el tiempo para los nuevos proyectos, de modo que las líneas de base de dos proyectos pueden ser muy distintas.

En adición a esto, se deben tener presente las diferencias metodológicas de los distintos estudios en el tiempo, la diferencia en la pericia de los especialistas, en la calidad y sensibilidad de los instrumentos, en los límites de detección de los análisis químicos de laboratorio, en la experiencia de los taxónomos involucrados en el análisis de los distintos grupos biológicos, etc.

Es intuitivo pensar que establecer condiciones de referencia forzarían al sistema a reducir los errores de muestreo y análisis, sin embargo, estas condiciones deben establecerse basadas en la información existente para los sistemas en evaluación. El desarrollo de estudios sistemáticos desarrollados en el tiempo, con todas las consideraciones estadísticas necesarias, permitiría establecer condiciones de referencia con un grado de confiabilidad mayor.

Por todo lo antes señalado, en este capítulo proponemos **condiciones de referencia operacionales**, bajo el supuesto de confiabilidad de los datos históricos obtenidos por distintos especialistas y para distintas empresas a diferentes tiempos. Las variables hidrogeológicas y parámetros bióticos y abióticos de lagunas superficiales (limnología) tienen criterios distintos de selección de las condiciones operacionales de referencia, los que se explican en el ítem respectivo.

#### **6.4.1. Variables abióticas: nivel freático, nivel lagunar, conductividad eléctrica superficial (limnómetros y reglillas) y superficie lagunar.**

Se tomó como criterio base el establecido en la Sección XII “Observaciones al Anexo III: Plan de contingencia modificado”, de la Adenda II- EIA Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama de SQM.

El principio de este plan es mantener el sistema dentro de su variación histórica natural, para lo cual se tomó como condición de referencia el penúltimo valor más bajo de la data histórica disponible por estación (verano e invierno) (Pramar Ambiental s, f), omitiendo valores anómalos que se alejen de la tendencia de los datos. Considerando que el objeto de definir valores de referencia es evaluar el estado de salud de las lagunas, utilizar el penúltimo valor de la serie temporal de datos disponible garantiza un umbral conservador respecto al diagnóstico de los cuerpos superficiales de agua. Mientras que para los barrenos pertenecientes al Plan de alerta temprana (PAT) de Albemarle, BA-05, BA-07 y BA-16 se considera como valor de referencia el umbral ya establecido en el PAT.

Se estimó pertinente utilizar este criterio, ya que fue aceptado por la CONAMA (Corporación Nacional del Medio Ambiente).

A continuación, se presenta los umbrales de referencia por variable, para las estaciones verano e invierno.

Tabla 6-72 Valores de referencia de nivel freático

Piezómetro	Verano (msnm)	Invierno (msnm)	Período de datos	
			Inicio	Término
BA-01	2.299,239	2.299,224	07-9-2013	06-12-2019
BA-02	2.299,624	2.299,868	19-08-2013	06-12-2019
BA-03	2.299,807	2.299,985	18-08-2013	06-12-2019
BA-04	2.300,182	2.300,253	22-06-2013	07-12-2019
BA-05	2.300,110	2.300,110	17-05-2013	26-12-2019
BA-06	2.299,740	2.299,998	17-05-2013	07-12-2019
BA-07	2.299,970	2.299,970	17-05-2013	26-12-2019
BA-08	2.300,332	2.300,426	17-05-2013	07-12-2019
BA-09	2.299,203	2.299,229	20-10-2013	21-12-2019
BA-10	2.299,406	2.299,637	07-09-2013	07-12-2019
BA-11	2.299,080	2.299,192	19-08-2013	07-12-2019
BA-12	2.299,345	2.299,650	19-08-2013	07-12-2019
BA-13	2.299,668	2.299,846	19-08-2013	07-12-2019
BA-14	2.299,881	2.300,005	21-06-2013	20-12-2019
BA-15	2.299,947	2.300,021	21-06-2013	20-12-2019
BA-16	2.300,800	2.300,800	17-05-2013	26-12-2019
BA-25	2.300,270	2.300,288	18-08-2013	08-11-2019
MP-01A	2.300,690	2.300,752	22-10-2013	07-12-2019
MP-01B	2.300,710	2.300,762	25-10-2013	07-12-2019
MP-01C	2.300,620	2.300,634	22-10-2013	07-12-2019
MP-03A	2.301,756	2.301,920	22-10-2013	07-12-2019
TPZ-10	2.301,630	2.301,730	01-02-2000	13-12-2018
TPZ-13C	2.300,244	2.300,283	29-01-2007	13-12-2018
TPZ-7B	2.302,253	2.302,333	01-02-2000	13-12-2018

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-73 Valores de referencia de nivel lagunar

Limnómetro o reglilla	Verano (msnm)	Invierno (msnm)	Período de datos	
			Inicio	Término
LB-21	2.300,080	2.300,090	01-1995	08-2018
LB-26	2.300,120	2.300,130	01-1995	08-2018
LB-28	2.300,100	2.300,130	01-1995	08-2018
LM-01	2.299,932	2.300,028	01-05-2016	07-12-2019
LM-02	2.299,931	2.300,026	01-05-2016	07-12-2019
LM-03	2.300,141	2.300,202	01-05-2016	07-12-2019
LM-04	2.300,114	2.300,148	01-05-2016	01-11-2019
LP-05	2.299,870	2.299,940	01-1995	08-2018
LP-08	2.300,240	2.300,240	01-1995	08-2018
LP-09	2.300,180	2.300,170	01-1995	08-2018

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-74 Valores de referencia de conductividad eléctrica en superficie de limnómetro y reglilla

Limnómetro o reglilla	Verano (µS/cm)	Invierno (µS/cm)	Período de datos	
			Inicio	Término
LB-21	107.300	71.300	01-1998	10-2018
LB-26	22.900	29.100	01-1998	10-2018
LB-28	141.000	74.000	01-1998	10-2018
LM-01	71.300	38.400	18-05-2016	18-10-2019
LM-02	72.700	36.500	18-05-2016	18-10-2019
LM-03	122.700	76.100	19-05-2016	18-10-2019
LM-04	130.100	74.800	19-05-2016	18-10-2019
LP- 05	40.800	23.200	01-1998	10-2018
LP-08	8.110	16.140	01-1998	10-2018
LP-09	20.000	16.930	01-1998	10-2018

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-75 Valores de referencia de superficie lagunar La Punta y La Brava

Superficie lagunar	Verano (ha)	Invierno (ha)	Período de datos	
			Inicio	Término
Profunda	9,09	23,58	05-08-1985	15-11-2019
Total (Profunda más superficial)	18,63	38,43	05-08-1985	15-11-2019

Fuente: Elaboración propia

Se observa que los valores de referencia de las variables nivel freático, nivel lagunar y superficie lagunar son menores en verano, mientras que para conductividad eléctrica los valores de referencia son mayores durante invierno, excepto en LB-21 y LP-08 (Tabla 6-72, Tabla 6-73. Tabla 6-74 y Tabla 6-75).

Se debe tomar en cuenta que la serie de datos de las variables nivel lagunar y conductividad eléctrica monitoreadas en los limnómetros, está acotada a un período de datos breve, desde 2016 a 2019, por lo que el valor umbral mostrado no es concluyente (Tabla 6-73 y Tabla 6-74).

#### 6.4.2. Variables químicas *in situ* y de laboratorio

Un criterio estadístico regularmente utilizado para establecer rangos confiables entre los que fluctúa una variable es la utilización de 2 desviaciones estándar, sin embargo, en el caso de los parámetros físicoquímicos *in situ* y de laboratorio, este criterio supera en muchos casos la dispersión del 90% de los datos e incluso los valores mínimos y máximos. Por otra parte, los valores mínimos y máximos son poco conservadores como criterio a utilizar, aún bajo la premisa de uso de metodologías estándares y/o errores sistemáticos. Esto porque hay muchos otros factores que pueden ocasionar valores fuera del rango esperado, también llamados *outliers*.

Dado lo antes señalado, el criterio propuesto a juicio de experto es utilizar los valores, superiores e inferiores, que limitan la distribución del 90% de la dispersión de los datos. Esto es considerar como valor referencial inferior el 5% y como valor referencial superior el 95%.

Los valores obtenidos en base a los datos históricos de parámetros físicoquímicos *in situ* y de laboratorio para el Sistema La Punta - La Brava, agrupando los datos por laguna y por período del año se detallan en Tabla 6-75, Tabla 6-76 y Tabla 6-77. Cabe señalar, que idealmente se debe considerar la variabilidad interanual, sin embargo, tal como se observa en las series de tiempo del capítulo 6.2 para cada parámetro, éstas no son continuas y en su mayoría no tienen un rango temporal de más de 10 años, de modo que se considere el efecto de fenómenos de mayor escala como los climáticos.

Tabla 6-76 Valores de referencia de parámetros *in situ* La Punta y La Brava

Parámetro	Laguna/período	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
Temperatura de agua °C	LB invierno	91	15,1	5,1	3,1	8,2	24,3	26,4
	LP invierno	78	11,6	3,8	2,6	7,0	20,2	23,4
	LB verano	86	24,6	4,4	13,3	17,4	31,0	33,5
	LP verano	78	22,3	3,1	15,3	17,2	26,7	31,3
pH	LB invierno	91	8,1	0,3	6,0	7,8	8,6	8,8
	LP invierno	78	8,3	0,2	7,4	7,9	8,7	8,8
	LB verano	86	8,0	0,3	7,4	7,5	8,5	8,7
	LP verano	78	8,1	0,7	4,2	7,7	8,6	9,0
OD_mg/L	LB invierno	91	8,1	2,4	1,1	4,0	11,5	12,0
	LP invierno	78	8,1	1,9	3,3	4,3	10,2	11,4
	LB verano	86	6,5	3,6	1,1	3,0	9,7	34,0
	LP verano	78	6,4	2,1	0,7	1,7	9,1	9,8
SO %	LB invierno	4	69,8	18,7	51,8	52,3	86,3	86,5
	LP invierno	0						
	LB verano	0						
	LP verano	0						
CE_mS/cm	LB invierno	87	65,6	22,5	24,7	31,4	98,0	112,6
	LP invierno	75	31,0	19,2	15,4	16,1	67,9	112,1
	LB verano	86	100,7	53,5	22,4	24,0	168,9	187,6
	LP verano	78	42,3	31,2	16,0	17,2	110,5	165,1
Sal	LB invierno	43	37,4	19,6	0,0	0,0	69,7	70,0
	LP invierno	28	22,5	21,2	0,0	0,0	67,7	87,2
	LB verano	39	43,5	26,5	0,0	0,0	70,0	70,0
	LP verano	33	30,2	22,3	0,0	0,0	70,2	81,4

Fuente: Elaboración propia. Temp: temperatura °C; OD\_mg/L: oxígeno disuelto (mg/L); SO: %saturación oxígeno; CE\_mS/cm: conductividad eléctrica (mS/cm); Sal: Salinidad\_(gNaCl/L).

En la Tabla 6-75, se destacan en rojo los valores de referencia superior (95%) e inferior (5%). El parámetro SO% (saturación de oxígeno) posee solo 4 datos para el período de invierno en la laguna La Brava. Se recomienda no considerar.

Por otra parte, en las Tabla 6-76 y Tabla 6-77 se muestran los resultados del cálculo de valores de referencia (destacados en rojo) para todos los parámetros de calidad de agua (80) y sedimentos (25), respectivamente. Cabe destacar que algunos parámetros poseen muy pocos datos y solo para un período por lo que se recomienda no considerar los valores obtenidos como referenciales. La cantidad de datos es fundamental para

determinar la confiabilidad de los valores obtenidos. El N de datos sugerido para su consideración es 30, pensando en una cantidad suficiente de datos que represente su distribución y para la aplicación de percentiles como criterio para fijar los valores de referencia. Basándonos en este criterio se podrían considerar solo 25 parámetros de los 80 de calidad de agua, indicados con asterisco en la Tabla 6-76, y solo 9 parámetros de los 25 de sedimento, también marcados con asterisco en la Tabla 6-77.

Tabla 6-77 Valores de referencia de parámetros químicos de la columna de agua.

Parámetro	Laguna/ período	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
Turb	LB invierno	26	3,5	2,6	0,7	0,8	8,4	10,3
	LP invierno	18	3,2	3,0	0,7	0,8	10,8	10,9
	LB verano	28	3,4	4,6	0,6	1,3	5,1	26,0
	LP verano	21	5,6	7,0	1,1	1,2	15,8	32,6
Densidad	LB invierno	4	1.003,3	3,3	1.001,0	1.001,0	1.007,3	1.008,0
	LP invierno	0						
	LB verano	0						
	LP verano	0						
Dureza	LB invierno	4	1.000,0	0,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0	1.000,0
	LP invierno	0						
	LB verano	0						
	LP verano	0						
Alcal*	LB invierno	79	510,0	194,0	229,0	293,9	802,8	970,0
	LP invierno	72	371,3	60,0	237,0	295,5	484,4	510,0
	LB verano	82	546,1	267,7	270,0	307,1	769,0	2.400,0
	LP verano	75	400,8	83,7	270,0	310,0	582,5	631,0
Color	LB invierno	10	4,7	0,9	2,0	3,4	5,0	5,0
	LP invierno	7	5,0	0,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	LB verano	19	11,5	9,2	5,0	5,0	26,8	43,0
	LP verano	15	12,3	11,1	5,0	5,0	30,4	36,0
Redox	LB invierno	7	-35,9	59,8	-118,6	-104,4	32,4	33,4
	LP invierno	4	-76,9	48,3	-136,8	-130,1	-30,4	-26,6
	LB verano	15	-94,6	84,3	-206,8	-186,6	14,4	127,2
	LP verano	11	-57,7	192,7	-190,8	-189,9	320,1	340,0
STD*	LB invierno	70	50.361,5	21.212,7	10.285,0	20.728,8	89.657,6	102.540,0
	LP invierno	63	17.547,3	7.814,2	9.493,0	10.051,4	32.374,0	47.090,0
	LB verano	73	93.610,2	57.362,4	14.458,0	16.011,8	176.236,0	241.805,0
	LP verano	69	23.969,1	15.741,1	10.091,0	10.818,2	58.230,0	73.830,0
STS*	LB invierno	67	60,6	45,6	2,0	5,0	153,5	200,7
	LP invierno	63	27,1	28,8	1,6	3,0	78,0	144,0
	LB verano	77	128,5	138,8	3,9	5,0	469,6	594,4
	LP verano	72	31,3	25,2	2,5	5,0	85,8	118,6
DBO	LB invierno	9	2,0	0,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	LP invierno	5	2,0	0,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	LB verano	19	3,6	2,3	1,0	1,9	8,1	9,0
	LP verano	14	4,1	2,2	2,0	2,0	8,4	9,0
Coli_fec	LB invierno	9	1,8	2,4E-16	1,8	1,8	1,8	1,8
	LP invierno	6	2,3	1,1	1,8	1,8	3,8	4,5
	LB verano	19	1,8	0,0	1,8	1,8	1,8	1,8
	LP verano	15	3,2	5,5	1,8	1,8	8,2	23,0
Coli_total	LB invierno	9	4,2	7,1	1,8	1,8	14,5	23,0
	LP invierno	6	7,0	12,7	1,8	1,8	25,2	33,0
	LB verano	19	1,8	0,0	1,8	1,8	1,8	1,8
	LP verano	15	3,2	5,5	1,8	1,8	8,2	23,0
AG	LB invierno	22	21,9	89,8	1,0	1,0	4,0	424,0
	LP invierno	15	52,5	192,7	1,0	1,0	227,5	749,0
	LB verano	24	2,5	1,0	1,0	1,2	4,0	4,0
	LP verano	18	2,3	1,0	1,0	1,0	4,0	4,0
HCf	LB invierno	1	5,00		5,00	5,00	5,00	5,00
	LP invierno	1	5,00		5,00	5,00	5,00	5,00

Parámetro	Laguna/ período	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
	LB verano	0						
	LP verano	0						
HCv	LB invierno	1	0,01		0,01	0,01	0,01	0,01
	LP invierno	1	0,01		0,01	0,01	0,01	0,01
	LB verano	0						
	LP verano	0						
Al	LB invierno	9	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
	LP invierno	6	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
	LB verano	19	0,411	0,177	0,073	0,073	0,500	0,500
	LP verano	15	0,415	0,177	0,073	0,073	0,500	0,500
Al_d	LB invierno	9	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
	LP invierno	6	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
	LB verano	15	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
	LP verano	12	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
As	LB invierno	9	3,304	2,002	1,180	1,181	6,054	6,430
	LP invierno	6	1,213	0,340	0,863	0,896	1,703	1,810
	LB verano	19	9,554	5,045	2,063	2,159	16,700	19,400
	LP verano	14	2,754	1,210	1,087	1,178	4,618	4,747
As_d*	LB invierno	45	3,584	2,179	0,003	0,122	7,091	8,382
	LP invierno	42	1,267	0,767	0,002	0,008	2,569	3,119
	LB verano	48	6,868	5,066	0,002	0,353	14,265	20,640
	LP verano	44	1,839	1,069	0,001	0,092	3,774	4,319
Ba	LB invierno	9	0,100	1,472E-17	0,100	0,100	0,100	0,100
	LP invierno	6	0,100	1,520E-17	0,100	0,100	0,100	0,100
	LB verano	19	0,292	0,347	0,013	0,038	1,001	1,010
	LP verano	14	0,306	0,429	0,044	0,047	1,099	1,170
Ba_d	LB invierno	10	7,166	22,114	0,100	0,100	38,898	70,100
	LP invierno	6	0,100	1,520E-17	0,100	0,100	0,100	0,100
	LB verano	17	4,021	11,072	0,005	0,047	32,440	35,000
	LP verano	11	0,074	0,023	0,040	0,041	0,102	0,102
Be	LB invierno	9	0,030	0,040	0,010	0,010	0,100	0,100
	LP invierno	6	0,010	0,000	0,010	0,010	0,010	0,010
	LB verano	15	0,039	0,053	0,010	0,010	0,164	0,168
	LP verano	12	0,011	0,003	0,010	0,010	0,015	0,020
Be_d	LB invierno	9	0,010	0,000	0,010	0,010	0,010	0,010
	LP invierno	6	0,010	0,000	0,010	0,010	0,010	0,010
	LB verano	15	0,019	0,013	0,010	0,010	0,040	0,040
	LP verano	12	0,010	1,812E-18	0,010	0,010	0,010	0,010
B	LB invierno	9	135,1	79,1	57,5	59,5	255,4	303,0
	LP invierno	6	40,5	12,2	29,5	29,7	56,6	57,3
	LB verano	19	238,8	106,9	51,0	69,6	373,0	407,2
	LP verano	14	78,9	32,1	34,8	42,2	128,1	155,2
B_d*	LB invierno	40	89,4	39,9	28,2	31,1	148,3	162,0
	LP invierno	38	33,3	12,2	16,1	19,1	58,5	61,4
	LB verano	45	197,1	116,1	38,4	42,6	358,2	383,0
	LP verano	42	61,6	31,5	19,5	25,7	121,0	142,4
Cd	LB invierno	9	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
	LP invierno	6	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
	LB verano	19	0,001	4,456E-19	0,001	0,001	0,001	0,001
	LP verano	15	0,001	4,489E-19	0,001	0,001	0,001	0,001

Parámetro	Laguna/ período	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
Cd_d*	LB invierno	45	2,526E-04	3,904E-04	6,000E-06	1,000E-05	0,001	0,001
	LP invierno	42	2,149E-04	3,466E-04	1,000E-05	1,075E-05	0,001	0,001
	LB verano	50	3,291E-04	4,442E-04	2,500E-05	2,500E-05	0,001	0,001
	LP verano	48	2,817E-04	4,197E-04	2,500E-05	2,500E-05	0,001	0,001
Co	LB invierno	9	1,148	0,617	0,300	0,316	1,666	1,690
	LP invierno	6	0,003	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003
	LB verano	19	0,021	0,023	0,003	0,003	0,050	0,050
	LP verano	15	499,157	1.933,129	0,003	0,003	2.246,135	7.487,000
Co_d	LB invierno	9	0,802	0,396	0,280	0,288	1,212	1,240
	LP invierno	6	0,003	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003
	LB verano	15	0,022	0,024	0,003	0,003	0,050	0,050
	LP verano	12	0,026	0,025	0,003	0,003	0,050	0,050
Cu	LB invierno	9	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,004
	LP invierno	6	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
	LB verano	19	0,014	0,011	0,005	0,006	0,027	0,053
	LP verano	14	0,007	0,003	0,003	0,003	0,011	0,012
Cu_d*	LB invierno	45	0,004	0,003	1,000E-04	0,001	0,008	0,016
	LP invierno	42	0,003	0,002	1,000E-04	1,450E-04	0,004	0,009
	LB verano	50	0,006	0,005	3,000E-05	0,001	0,013	0,032
	LP verano	47	0,004	0,002	3,000E-05	0,001	0,008	0,009
Cr	LB invierno	9	0,003	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003
	LP invierno	6	0,003	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003
	LB verano	19	0,008	0,010	0,002	0,002	0,025	0,025
	LP verano	15	0,006	0,008	0,002	0,002	0,023	0,026
Cr_d	LB invierno	9	0,008	0,016	0,003	0,003	0,031	0,050
	LP invierno	6	0,003	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003
	LB verano	15	0,002	8,978E-19	0,002	0,002	0,002	0,002
	LP verano	12	0,002	4,530E-19	0,002	0,002	0,002	0,002
Sn	LB invierno	9	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
	LP invierno	6	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
	LB verano	19	0,405	0,188	0,050	0,050	0,500	0,500
	LP verano	15	0,410	0,186	0,050	0,050	0,500	0,500
Sn_d	LB invierno	9	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
	LP invierno	6	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
	LB verano	15	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
	LP verano	12	0,500	0,000	0,500	0,500	0,500	0,500
Fe	LB invierno	9	0,003	0,001	0,003	0,003	0,006	0,007
	LP invierno	6	0,003	0,001	0,003	0,003	0,005	0,005
	LB verano	19	0,060	0,074	0,004	0,005	0,211	0,259
	LP verano	15	0,021	0,014	0,006	0,007	0,043	0,055
Fe_d*	LB invierno	45	0,013	0,016	0,002	0,003	0,040	0,084
	LP invierno	44	0,013	0,015	1,700E-05	0,001	0,055	0,068
	LB verano	50	0,020	0,033	0,002	0,003	0,073	0,195
	LP verano	48	0,016	0,016	0,000	0,003	0,050	0,077
Li	LB invierno	9	154,2	68,5	63,5	63,7	218,8	220,0
	LP invierno	6	63,9	23,3	44,7	44,9	93,1	93,1
	LB verano	19	258,7	124,8	53,0	53,9	418,1	451,0
	LP verano	15	84,7	37,4	31,0	36,6	141,4	154,0
Li_d*	LB invierno	26	141,3	67,7	45,7	46,9	257,8	291,0
	LP invierno	24	41,8	26,4	0,2	0,2	90,9	101,6

Parámetro	Laguna/ período	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
	LB verano	32	229,6	214,9	1,0	21,6	486,6	1106,0
	LP verano	30	58,8	40,7	0,0	8,0	120,2	193,3
Mn	LB invierno	9	0,003	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003
	LP invierno	6	0,003	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003
	LB verano	19	0,004	0,001	0,004	0,004	0,005	0,009
	LP verano	15	0,005	0,004	0,004	0,004	0,012	0,020
Mn_d	LB invierno	9	0,003	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003
	LP invierno	6	0,003	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003
	LB verano	15	0,004	1,796E-18	0,004	0,004	0,004	0,004
	LP verano	12	0,004	9,059E-19	0,004	0,004	0,004	0,004
Hg	LB invierno	9	0,0005	0,0000	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
	LP invierno	6	0,0005	0,0000	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
	LB verano	19	0,0005	8,377E-05	0,0003	0,0003	0,0005	0,0005
	LP verano	15	0,0005	8,281E-05	0,0003	0,0003	0,0005	0,0005
Hg_d	LB invierno	9	0,0005	0,0000	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
	LP invierno	6	0,0005	0,0000	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
	LB verano	15	0,0005	2,245E-19	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
	LP verano	12	0,0005	1,132E-19	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Mo	LB invierno	9	0,211	0,033	0,200	0,200	0,260	0,300
	LP invierno	6	0,100	1,520E-17	0,100	0,100	0,100	0,100
	LB verano	19	0,209	0,196	0,003	0,014	0,356	0,960
	LP verano	15	0,085	0,041	0,003	0,025	0,134	0,164
Mo_d	LB invierno	9	0,233	0,050	0,200	0,200	0,300	0,300
	LP invierno	6	0,100	1,520E-17	0,100	0,100	0,100	0,100
	LB verano	15	0,142	0,072	0,003	0,007	0,237	0,254
	LP verano	12	0,073	0,045	0,003	0,003	0,145	0,155
Ni	LB invierno	9	0,0010	0,0000	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	LP invierno	6	0,0010	0,0000	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	LB verano	19	0,0030	8,911E-19	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
	LP verano	15	0,0030	4,489E-19	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
Ni_d	LB invierno	9	0,0010	0,0000	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	LP invierno	6	0,0010	0,0000	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	LB verano	15	0,0030	4,489E-19	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
	LP verano	12	0,0030	4,530E-19	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
Ag	LB invierno	9	0,390	0,158	0,180	0,184	0,530	0,530
	LP invierno	6	0,085	0,035	0,060	0,060	0,130	0,130
	LB verano	19	0,095	0,154	0,002	0,002	0,353	0,380
	LP verano	15	0,028	0,039	0,002	0,002	0,110	0,110
Ag_d	LB invierno	9	0,158	0,064	0,070	0,070	0,210	0,210
	LP invierno	6	0,060	0,024	0,040	0,040	0,090	0,090
	LB verano	15	0,115	0,158	0,003	0,003	0,353	0,360
	LP verano	12	0,028	0,032	0,003	0,003	0,085	0,090
Pb	LB invierno	9	0,0023	0,0007	0,0004	0,0012	0,0025	0,0025
	LP invierno	6	0,0025	0,0000	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
	LB verano	19	0,0079	0,0015	0,0025	0,0075	0,0083	0,0110
	LP verano	15	0,0080	3,591E-18	0,0080	0,0080	0,0080	0,0080
Pb_d*	LB invierno	53	0,0864	0,4288	5,323E-09	5,323E-09	0,0141	2,2310
	LP invierno	45	0,3330	1,2887	5,323E-09	4,529E-07	2,9184	6,4680
	LB verano	50	0,0027	0,0033	0,0000	7,790E-06	0,0080	0,0080
	LP verano	48	0,0024	0,0033	6,468E-06	6,468E-06	0,0080	0,0080

Parámetro	Laguna/ período	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
Se	LB invierno	9	0,0010	0,0000	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	LP invierno	6	0,0010	0,0000	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	LB verano	19	0,0018	0,0017	0,0010	0,0010	0,0050	0,0050
	LP verano	15	0,0018	0,0017	0,0010	0,0010	0,0050	0,0050
Se_d	LB invierno	9	0,0010	0,0000	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	LP invierno	6	0,0010	0,0000	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	LB verano	15	0,0010	4,489E-19	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	LP verano	12	0,0011	0,0004	0,0010	0,0010	0,0017	0,0025
V	LB invierno	9	0,0889	0,0332	0,0005	0,0403	0,1000	0,1000
	LP invierno	6	0,0025	0,0000	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
	LB verano	15	0,0549	0,0633	0,0025	0,0025	0,1309	0,2030
	LP verano	12	0,0513	0,0509	0,0025	0,0025	0,1000	0,1000
V_d	LB invierno	9	0,1000	1,472E-17	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
	LP invierno	6	0,0025	0,0000	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
	LB verano	15	0,0415	0,0494	0,0025	0,0025	0,1000	0,1000
	LP verano	12	0,0513	0,0509	0,0025	0,0025	0,1000	0,1000
Zn	LB invierno	9	0,0040	0,0072	0,0005	0,0005	0,0160	0,0222
	LP invierno	6	0,0010	0,0010	0,0005	0,0005	0,0025	0,0031
	LB verano	19	0,0903	0,0900	0,0050	0,0064	0,2524	0,2740
	LP verano	15	0,0300	0,0286	0,0041	0,0047	0,0925	0,0960
Zn_d*	LB invierno	45	0,0114	0,0161	0,0005	0,0005	0,0256	0,1020
	LP invierno	42	0,0099	0,0083	0,0005	0,0005	0,0250	0,0320
	LB verano	50	0,0099	0,0113	2,500E-05	3,000E-05	0,0330	0,0480
	LP verano	47	0,0089	0,0095	0,0000	0,0000	0,0323	0,0410
Ca	LB invierno	4	160,00	24,11	134,00	135,80	184,20	186,00
	LP invierno	0						
	LB verano	4	631,81	99,45	534,00	543,83	747,82	769,65
	LP verano	3	284,10	90,74	184,90	196,86	357,06	362,90
Ca_d*	LB invierno	66	567,06	694,23	113,00	179,50	832,00	5.700,00
	LP invierno	63	251,26	105,81	80,33	114,16	487,40	523,50
	LB verano	69	720,65	432,40	81,00	151,00	1429,00	1581,00
	LP verano	66	262,83	153,50	48,00	118,25	558,95	803,00
HCO3*	LB invierno	78	346,03	160,23	0,00	146,90	616,80	716,00
	LP invierno	71	372,27	118,00	0,00	217,50	532,35	585,96
	LB verano	82	423,72	334,16	4,00	67,30	1078,05	1.516,00
	LP verano	75	358,83	167,60	1,29	176,42	639,23	965,80
CO3*	LB invierno	78	120,77	87,44	1,00	2,00	255,60	289,00
	LP invierno	71	53,02	44,86	0,00	2,50	117,50	215,00
	LB verano	82	264,94	219,98	1,00	3,10	695,75	821,00
	LP verano	75	107,53	78,72	1,00	4,40	237,70	430,00
CN	LB invierno	9	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
	LP invierno	6	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
	LB verano	15	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
	LP verano	12	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
Cl*	LB invierno	82	25.659,55	11.306,33	8.067,00	9.661,60	41.600,30	62.620,00
	LP invierno	71	10.608,62	8.673,19	31,00	4.731,07	29.257,00	48.424,70
	LB verano	82	48.212,87	31.287,65	6.397,00	7.591,15	87.529,35	150.259,00
	LP verano	75	15.961,71	19.400,63	5,00	4.876,30	47.891,10	135.029,00
F*	LB invierno	27	0,35	0,19	0,10	0,10	0,59	0,69
	LP invierno	36	0,53	0,21	0,10	0,17	0,85	1,10

Parámetro	Laguna/ período	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
	LB verano	33	0,35	0,16	0,10	0,10	0,50	0,50
	LP verano	42	0,54	0,12	0,30	0,37	0,70	0,80
Mg	LB invierno	13	1.453,2	615,9	848,0	859,4	2.234,2	2.299,0
	LP invierno	5	655,4	143,2	534,0	546,8	849,0	903,0
	LB verano	19	2.525,4	1.090,2	470,0	589,7	3.628,1	3.971,0
	LP verano	12	679,0	300,6	293,0	346,9	1.181,8	1.239,0
Mg_d*	LB invierno	66	1.312,33	520,70	1,00	580,75	2.020,25	2.302,00
	LP invierno	63	441,65	204,12	106,10	194,12	867,60	1.026,00
	LB verano	69	2.340,96	1.356,72	389,00	462,40	4.096,40	4.613,00
	LP verano	65	601,26	365,78	226,00	260,52	1.252,24	2.080,00
K	LB invierno	9	2.360,0	1.064,5	1109,0	1.127,0	3.497,8	3.537,0
	LP invierno	6	1.093,3	365,7	797,0	807,0	1.579,0	1.599,0
	LB verano	19	4297,6	2.579,6	0,4	665,1	7.191,2	7.256,0
	LP verano	15	1.495,2	777,8	536,0	699,8	2.840,1	2.999,0
K_d*	LB invierno	66	2.292,1	1.170,8	0,0	761,0	3.883,3	5.781,0
	LP invierno	63	768,0	445,2	180,0	388,2	1.538,1	2.532,5
	LB verano	69	4.615,6	3.458,4	0,0	116,3	10.882,8	15.329,0
	LP verano	66	1.111,1	792,5	126,4	454,5	2.557,8	4.716,0
Na	LB invierno	4	13.744,0	328,5	13.324,0	13.372,3	14.032,4	14.045,0
	LP invierno	0						
	LB verano	4	34.323,3	2.205,6	31.320,0	31.725,8	36.067,8	36.108,0
	LP verano	3	10.116,7	4.266,0	7.515,0	7.543,0	14.315,5	15.040,0
Na_d*	LB invierno	66	14.818,9	9.751,5	2.093,0	5.289,0	28.344,3	68.420,0
	LP invierno	63	4.613,2	2.538,1	2.358,0	2.502,1	9.399,8	15.610,0
	LB verano	69	27.672,9	21.881,7	2.876,0	4.286,6	51.368,0	149.400,0
	LP verano	66	6.179,4	4.277,3	2.257,0	2.720,8	15.358,5	24.320,0
Si	LB invierno	9	31,66	14,27	22,90	23,14	55,90	67,50
	LP invierno	6	42,07	16,46	21,10	24,88	64,98	70,10
	LB verano	19	39,05	37,72	12,60	13,14	112,66	156,40
	LP verano	15	50,00	23,47	0,00	11,48	79,20	82,00
SO4*	LB invierno	82	3.687,0	1.628,8	560,0	1.078,1	6.292,8	7.261,0
	LP invierno	71	1.608,4	1.431,8	305,0	379,5	3.609,9	8.532,0
	LB verano	82	5.631,1	3.851,6	188,0	574,5	12.832,4	15.328,0
	LP verano	75	1.977,5	1.735,0	186,0	235,5	4.676,6	9.755,5
NH4*	LB invierno	79	0,169	0,207	0,009	0,010	0,444	1,370
	LP invierno	69	0,072	0,075	0,009	0,010	0,251	0,285
	LB verano	78	0,157	0,180	5,000E-06	0,009	0,511	0,800
	LP verano	73	0,069	0,073	0,009	0,010	0,205	0,289
Cla	LB invierno	16	3,068	5,553	0,000	0,000	13,325	20,900
	LP invierno	10	0,825	0,818	0,000	0,018	1,979	2,780
	LB verano	17	0,986	2,107	0,000	0,000	5,780	7,300
	LP verano	9	1,450	2,076	0,000	0,000	4,684	5,700
P	LB invierno	18	0,795	0,627	0,090	0,243	2,298	2,430
	LP invierno	11	0,581	0,497	0,150	0,155	1,295	1,340
	LB verano	21	1,739	1,784	0,050	0,050	4,330	4,780
	LP verano	12	0,680	0,567	0,040	0,057	1,439	1,480
MO	LB invierno	11	28,01	28,94	1,90	3,35	65,50	65,70
	LP invierno	7	28,10	30,95	2,30	2,36	64,47	66,90
	LB verano	15	5,67	3,56	2,00	2,14	11,54	12,80
	LP verano	11	4,61	4,39	2,00	2,00	11,95	17,00

Parámetro	Laguna/ período	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
NO3*	LB invierno	76	0,779	1,274	0,023	0,046	3,650	5,933
	LP invierno	74	0,525	0,712	0,023	0,046	1,403	5,263
	LB verano	76	1,117	1,667	0,020	0,046	4,744	8,413
	LP verano	77	0,877	1,494	0,020	0,046	4,640	7,400
NO2*	LB invierno	66	0,034	0,120	0,000	2,000E-04	0,383	0,500
	LP invierno	52	0,010	0,036	0,000	1,100E-04	0,023	0,187
	LB verano	60	0,004	0,009	0,000	2,000E-04	0,021	0,040
	LP verano	52	0,004	0,008	0,000	2,000E-04	0,023	0,039
N	LB invierno	25	0,940	0,879	0,010	0,010	2,644	3,480
	LP invierno	17	0,980	0,921	0,010	0,010	2,748	3,220
	LB verano	28	0,723	0,645	0,010	0,010	1,716	2,620
	LP verano	21	0,695	0,587	0,010	0,010	1,650	2,230
PO4u*	LB invierno	78	987,45	750,89	0,50	1,24	2.144,70	2.355,00
	LP invierno	71	331,58	242,84	0,50	2,05	774,50	942,00
	LB verano	82	2.579,21	1.769,17	0,50	1,91	5.116,50	5.990,00
	LP verano	75	710,25	718,18	0,50	7,88	1.528,20	5.120,00
PO4m*	LB invierno	70	1,14	0,67	0,02	0,09	2,15	2,36
	LP invierno	66	0,13	0,22	0,01	0,01	0,57	0,81
	LB verano	73	2,72	1,78	0,09	0,20	5,13	5,99
	LP verano	69	0,28	0,70	0,01	0,01	1,19	5,12

Fuente: Elaboración propia. Turb: Turbidez\_(NTU); Alcal: Alcalinidad\_(mgCaCO3/L); Redox: Potencial\_redox\_(mV); STD: Sólidos Totales Disueltos\_(mg/L); STS: Sólidos Totales Suspendidos\_(mg/L); DBO: DBO5\_(mg/L); Coli\_fec: Coliformes\_fecales\_(NMP/100mL); Coli\_total: Coliformes\_totales\_(NMP/100mL); AG: Aceites\_y\_grasas\_(mg/L); Al: Aluminio\_(mg/L); Al\_d: Aluminio\_disuelto\_(mg/L); As: Arsénico\_(mg/L); As\_d: Arsénico\_disuelto\_(mg/L); Ba: Bario\_(mg/L); Ba\_d: Bario\_disuelto\_(mg/L); Be: Berilio\_(mg/L); Be\_d: Berilio\_disuelto\_(mg/L); B: Boro\_(mg/L); B\_d: Boro\_disuelto\_(mg/L); Cd: Cadmio\_(mg/L); Cd\_d: Cadmio\_disuelto\_(mg/L); Co: Cobalto\_(mg/L); Co\_d: Cobalto\_disuelto\_(mg/L); Cu: Cobre\_(mg/L); Cu\_d: Cobre\_disuelto\_(mg/L); Cr: Cromo\_(mg/L); Cr\_d: Cromo\_disuelto\_(mg/L); Sn: Estaño\_(mg/L); Sn\_d: Estaño\_disuelto\_(mg/L); Fe: Hierro\_(mg/L); Fe\_d: Hierro\_disuelto\_(mg/L); Li: Litio\_(mg/L); Li\_d: Litio\_disuelto\_(mg/L); Mn: Manganeso\_(mg/L); Mn\_d: Manganeso\_disuelto\_(mg/L); Hg: Mercurio\_(mg/L); Hg\_d: Mercurio\_disuelto\_(mg/L); Mo: Molibdeno\_(mg/L); Mo\_d: Molibdeno\_disuelto\_(mg/L); Ni: Niquel\_(mg/L); Ni\_d: Niquel\_disuelto\_(mg/L); Ag: Plata\_(mg/L); Ag\_d: Plata\_disuelto\_(mg/L); Pb: Plomo\_(mg/L); Pb\_d: Plomo\_disuelto\_(mg/L); Se: Selenio\_(mg/L); Se\_d: Selenio\_disuelto\_(mg/L); V: Vanadio\_(mg/L); V\_d: Vanadio\_disuelto\_(mg/L); Zn: Zinc\_(mg/L); Zn\_d: Zinc\_disuelto\_(mg/L); HCO3: Bicarbonato\_(mg/L); Ca\_d: Calcio\_disuelto\_(mg/L); Ca: Calcio\_(mg/L); CO3: Carbonato\_(mg/L); CN: Cianuro\_(mg/L); Cl: Cloruro\_(mg/L); Fl: Fluoruro\_(mg/L); Mg: Magnesio\_disuelto\_(mg/L); Mg\_d: Magnesio\_(mg/L); K: Potasio\_disuelto\_(mg/L); K: Potasio\_(mg/L); Si: Silice\_(mg/L); Na\_d: Sodio\_disuelto\_(mg/L); Na: Sodio\_(mg/L); SO4: Sulfato\_(mg/L); NH4: Amonio\_(mg/L); Cla: Clorofila\_a\_(mg/L); P: Fósforo\_(mg/L); MO: Materia\_organica\_(%); NO3: Nitrato\_(mg/L); NO2: Nitrito\_(mg/L); N: Nitrógeno\_Kjeldhal\_(mg/L); PO4u: Ortofosfato\_(mg/L); PO4m: Ortofosfato\_(mg/L).

Tabla 6-78 Valores de referencia de parámetros químicos de sedimentos

Parámetro	Laguna/período	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
sMO	LB invierno	12	15,05	4,38	6,83	7,68	20,48	21,77
	LP invierno	8	12,13	1,70	8,28	9,51	13,59	13,66
	LB verano	9	13,08	2,42	8,50	9,39	15,77	16,45
	LP verano	6	10,54	2,06	6,96	7,81	12,76	12,98
sRedox	LB invierno	12	-383,14	53,93	-475,10	-462,56	-311,40	-281,70
	LP invierno	8	-369,08	71,18	-459,10	-450,56	-266,82	-235,70
	LB verano	9	-386,39	37,91	-445,40	-442,28	-343,30	-341,30
	LP verano	6	-363,02	27,73	-398,40	-397,23	-332,65	-328,40
sAl	LB invierno	7	304,00	247,65	61,00	91,60	680,20	811,00
	LP invierno	4	177,00	176,57	5,00	16,40	378,90	408,00
	LB verano	11	304,55	297,85	5,00	5,00	786,50	790,00
	LP verano	8	246,75	272,17	5,00	5,00	598,45	624,00
sAs*	LB invierno	27	275,89	213,54	15,60	51,91	642,40	789,85
	LP invierno	14	115,75	55,89	8,90	52,69	208,10	251,00
	LB verano	31	263,00	190,11	49,30	68,80	696,50	773,50
	LP verano	18	121,98	54,19	58,10	63,97	206,60	295,00
sBa	LB invierno	7	52,49	38,87	11,60	15,50	110,94	126,00
	LP invierno	4	116,20	30,36	89,10	90,39	151,60	157,00
	LB verano	11	38,41	47,41	1,00	1,00	116,55	139,00
	LP verano	8	57,39	63,79	1,00	1,00	142,80	147,00
sBe	LB invierno	7	0,17	0,08	0,10	0,10	0,27	0,30
	LP invierno	4	0,33	0,22	0,10	0,12	0,57	0,60
	LB verano	11	1,95	1,46	0,10	0,10	3,00	3,00
	LP verano	8	1,55	1,55	0,10	0,10	3,00	3,00
sB*	LB invierno	27	2.544,81	2.157,92	270,20	544,36	7.391,01	9.204,00
	LP invierno	14	512,23	676,46	43,44	65,58	1.670,87	2.662,00
	LB verano	31	1.867,04	1.072,14	361,65	408,89	3.728,50	4.313,00
	LP verano	18	448,99	513,87	86,83	96,73	1.126,39	2.322,00
sCd*	LB invierno	27	0,37	0,57	0,04	0,05	0,85	2,95
	LP invierno	14	0,16	0,11	0,04	0,06	0,38	0,40
	LB verano	31	0,34	0,79	0,04	0,04	0,80	4,45
	LP verano	18	0,11	0,06	0,04	0,04	0,20	0,20
sCo	LB invierno	7	6,81	2,38	5,20	5,20	10,61	11,60
	LP invierno	4	13,30	1,87	10,50	11,04	14,37	14,40
	LB verano	11	2,09	1,26	0,50	0,50	3,00	3,00
	LP verano	8	1,75	1,34	0,50	0,50	3,00	3,00
sCu*	LB invierno	26	37,85	33,67	1,04	3,89	93,00	123,80
	LP invierno	14	35,15	47,29	0,60	2,16	114,00	127,00
	LB verano	31	19,18	17,77	2,86	3,75	53,60	83,90
	LP verano	18	31,39	42,14	3,00	3,43	122,00	122,00
sCOT*	LB invierno	27	40,51	42,89	0,87	1,65	111,59	126,30
	LP invierno	16	39,40	38,87	0,96	1,76	92,78	103,80
	LB verano	32	25,48	32,93	1,87	2,26	84,39	95,40
	LP verano	21	20,69	26,91	2,82	3,10	70,10	75,30
sCr	LB invierno	7	0,50	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50
	LP invierno	4	0,50	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50
	LB verano	11	0,50	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50
	LP verano	8	1,63	2,08	0,50	0,50	5,00	5,00

Parámetro	Laguna/periodo	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
sP*	LB invierno	39	76,57	74,56	0,50	3,09	208,75	319,05
	LP invierno	22	51,57	46,93	1,38	2,93	118,53	119,00
	LB verano	44	77,71	49,85	3,61	10,42	161,19	229,00
	LP verano	27	42,99	40,83	0,50	2,25	124,78	185,00
sFe*	LB invierno	27	190,92	141,08	59,00	77,29	288,69	803,00
	LP invierno	14	73,13	63,22	12,50	20,11	182,10	264,00
	LB verano	31	217,37	150,27	7,00	34,07	485,50	574,00
	LP verano	18	114,21	93,30	19,17	20,73	279,85	330,00
sLi	LB invierno	7	694,29	399,86	363,13	388,38	1.316,69	1.526,78
	LP invierno	4	245,75	187,97	27,38	53,82	450,42	482,33
	LB verano	11	547,87	374,88	173,74	185,50	1.168,96	1.247,76
	LP verano	8	208,03	175,03	27,73	40,14	481,86	545,32
sMn	LB invierno	7	17,91	17,51	6,70	7,72	44,44	57,10
	LP invierno	4	3,78	3,62	1,10	1,25	8,16	9,10
	LB verano	11	9,30	4,22	4,20	4,60	16,50	18,00
	LP verano	8	5,40	5,60	0,10	0,10	14,25	16,00
sHg	LB invierno	7	0,06	0,11	0,02	0,02	0,22	0,31
	LP invierno	4	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03
	LB verano	11	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
	LP verano	8	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
sMo	LB invierno	7	19,14	20,23	6,00	6,30	49,90	64,00
	LP invierno	4	7,75	2,06	5,00	5,45	9,70	10,00
	LB verano	11	12,18	8,78	5,00	5,00	26,50	28,00
	LP verano	8	9,75	5,63	5,00	5,00	17,60	19,00
sNi	LB invierno	7	0,50	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50
	LP invierno	4	0,50	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50
	LB verano	11	3,18	3,35	0,50	1,00	9,25	11,00
	LP verano	8	7,73	16,40	0,50	0,50	33,58	48,00
sN	LB invierno	19	877,43	1.419,30	3,60	3,96	3.446,70	3.930,00
	LP invierno	12	539,41	952,18	2,45	3,24	2.058,95	3.143,00
	LB verano	24	2.525,63	2.809,20	2,00	3,00	8.695,75	9.473,00
	LP verano	17	2.217,81	2.250,79	2,20	2,28	6.409,40	6.643,00
sAg	LB invierno	7	561,51	1.485,36	0,10	0,10	2.751,03	3.930,00
	LP invierno	4	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10	0,10
	LB verano	11	865,27	2.854,86	3,00	3,25	4.739,00	9.473,00
	LP verano	8	5,88	1,13	4,10	4,42	7,00	7,00
sPb*	LB invierno	27	2,59	3,59	0,04	0,04	9,76	15,80
	LP invierno	14	1,35	1,19	0,04	0,04	3,73	4,05
	LB verano	31	1,85	3,30	0,04	0,04	10,00	13,50
	LP verano	18	1,12	1,41	0,04	0,04	2,66	6,40
sSe	LB invierno	7	3,49	1,33	2,00	2,09	5,13	5,16
	LP invierno	4	4,59	0,84	3,51	3,65	5,40	5,49
	LB verano	11	4,17	1,93	1,21	1,52	6,22	6,26
	LP verano	8	4,01	1,77	1,59	1,89	6,12	6,20
sV	LB invierno	7	9,43	2,37	7,00	7,00	12,70	13,00
	LP invierno	4	73,50	59,84	40,00	40,15	146,05	163,00
	LB verano	11	7,08	6,39	1,00	1,00	16,90	18,50
	LP verano	8	21,78	28,65	1,00	1,00	65,86	83,60
sZn*	LB invierno	27	8,43	9,47	0,90	1,80	20,24	49,10
	LP invierno	14	5,20	6,56	0,60	0,86	15,12	26,10

Parámetro	Laguna/período	Métrica						
		N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
	LB verano	31	6,52	4,37	0,04	0,04	11,97	21,00
	LP verano	18	6,70	4,30	2,11	2,70	14,45	17,00

Fuente: Elaboración propia. sMO: Materia\_Orgánica(%); sredox: Potencial\_Redox\_(mV); sAl: Aluminio\_(mg/kg); sAs: Arsénico\_(mg/kg); sBa: Bario\_(mg/kg); sBe: Berilio\_(mg/kg); sB: Boro\_(mg/kg); sCa: Cadmio\_(mg/kg); sCo: Cobalto\_(mg/kg); sCu: Cobre\_(mg/kg); sCOT: COT\_(%); sCr: Cromo\_(mg/kg); sP: Fósforo\_(mg/kg); sFe: Hierro\_(mg/kg); sLi: Litio\_(mg/kg); sMn: Manganeso\_(mg/kg); sHg: Mercurio\_(mg/kg); sMo: Molibdeno\_(mg/kg); sNi: Níquel\_(mg/kg); sN: Nitrógeno\_kjeldahl\_(mg/kg); sAg: Plata\_(mg/kg); sPb: Plomo\_(mg/kg); sSe: Selenio\_(mg/kg); sV: Vanadio\_(mg/kg); sZn: Zinc\_(mg/kg); dens: Densidad\_(g/L); dur: Dureza\_(mg/L); color: Color\_(Pt-Co); HCf: Hidrocarburos\_fijos; HCv: Hidrocarburos\_volátiles.

### 6.4.3. Variables biológicas

El caso de las variables biológicas es aún más complejo que el de las fisicoquímicas, ya que, si bien regularmente se utilizan los índices comunitarios para evaluarlas, **es la composición de especies la que realmente da cuenta del estado de salud del sistema**, tal como se aplica en el SEIA. Dos comunidades con exactamente los mismos valores de índices comunitarios, esto es misma riqueza, con las mismas densidades y por lo tanto igual diversidad, pueden darse en ecosistemas totalmente diferentes con especies que indicarían condiciones de baja calidad en un caso y de muy buena calidad en el otro. Por esta razón solo se recomienda el uso de estos indicadores en la medida que sea considerada en primera instancia la composición de especies. Esto ya que desde el punto de vista de la conservación resulta útil el uso de estos índices comunitarios.

Dicho esto, en las Tabla 6-79, Tabla 6-80, Tabla 6-81 y Tabla 6-82 se indican los rangos obtenidos para cada comunidad biológica, según los 3 parámetros estimados para cada una de ellas, que son densidad (D), riqueza (S) y diversidad (H), agrupados por laguna. Cabe señalar que estos rangos se obtienen a partir de los datos recopilados en un rango temporal acotado y con todas las brechas metodológicas de muestreo y análisis que ya fueron señalados.

Tabla 6-79 Resumen comportamiento histórico de las comunidades fitobentónicas

Indicador/período	Laguna	N datos	Promedio	SD	Mínimo	5%	95%	Máximo
FBD verano	La_Brava	32	270.946,35	473.508,42	127,80	1.444,10	968.785,86	2347.919,00
	La_Punta	24	46.255,86	100.530,17	759,00	1.665,37	158.690,26	474.618,40
FBD invierno	La_Brava	36	38.645,60	66.903,06	0,40	0,68	166.039,70	299.000,90
	La_Punta	23	28.883,37	59.516,70	0,59	1,62	125.451,75	259.948,93
FBS verano	La_Brava	32	11	6	2	4	19	23
	La_Punta	24	9	5	2	2	15	22
FBS invierno	La_Brava	36	11	4	3	6	18	22
	La_Punta	23	13	4	6	7	20	20
FBH verano	La_Brava	28	1,50	0,72	0,14	0,47	2,62	2,71
	La_Punta	21	1,61	0,63	0,26	0,54	2,53	2,58
FBH invierno	La_Brava	33	1,35	0,62	0,09	0,44	2,33	2,44
	La_Punta	20	1,71	0,59	0,29	0,33	2,43	2,56

Fuente: Elaboración propia. FBD: densidad de fitobentos (cél/mm<sup>2</sup>); FBS: riqueza taxonómica del fitobentos; FBH: diversidad del fitobentos.

Tabla 6-80 Resumen comportamiento histórico de las comunidades fitoplanctónicas

Indicador/periodo	Laguna	N datos	Promedio	Std	Mínimo	5%	95%	Máximo
FPD verano	La_Brava	32	1.253,40	3.054,01	0,00	3,46	9.072,56	10.110,38
	La_Punta	24	1.068,41	2.815,04	0,73	3,00	8.721,35	9.992,65
FPD invierno	La_Brava	37	485,07	987,95	0,45	1,03	2.379,44	4.905,00
	La_Punta	23	132,49	192,82	0,07	0,18	603,09	685,20
FPS verano	La_Brava	32	9	4	1	2	15	16
	La_Punta	24	9	5	2	3	19	19
FPS invierno	La_Brava	37	11	6	1	3	24	30
	La_Punta	23	10	5	3	4	20	20
FPH verano	La_Brava	28	1,54	0,61	0,34	0,61	2,46	2,52
	La_Punta	21	1,55	0,69	0,58	0,59	2,40	2,56
FPH invierno	La_Brava	33	1,27	0,57	0,34	0,53	2,15	2,38
	La_Punta	20	1,37	0,59	0,34	0,40	2,12	2,20

Fuente: Elaboración propia. FPD: densidad de fitoplancton (cél/mL); FPS: riqueza taxonómica del fitoplancton; FPH: diversidad del fitoplancton.

Tabla 6-81 Resumen comportamiento histórico de las comunidades zoobentónicas

Indicador/periodo	Laguna	N datos	Promedio	Std	Mínimo	5%	95%	Máximo
ZBDv verano	La_Brava	13	1.612,28	3.932,15	0,00	0,00	10.202,06	11.489,90
	La_Punta	9	322,68	493,53	0,00	0,00	1.085,88	1.136,40
ZBDv invierno	La_Brava	20	23.338,85	58.597,83	0,00	0,00	127.760,00	233.400,00
	La_Punta	14	32.944,29	123.260,47	0,00	0,00	161.429,10	461.200,00
ZBDa verano	La_Brava	27	4.994,99	7.918,48	0,00	0,00	18.390,30	31.592,40
	La_Punta	21	11.375,78	19.541,65	0,00	0,00	59.772,00	62.500,00
ZBDa invierno	La_Brava	25	8.587,61	11.546,74	0,00	140,88	29.797,60	40.783,00
	La_Punta	17	19.889,54	57.105,26	0,00	100,00	60.793,80	240.333,00
ZBS verano	La_Brava	31	1	1	0	0	3	6
	La_Punta	24	1	1	0	0	4	4
ZBS invierno	La_Brava	33	2	1	0	1	5	6
	La_Punta	23	3	2	0	0	6	7
ZBH verano	La_Brava	26	0,15	0,29	0,00	0,00	0,66	1,09
	La_Punta	19	0,09	0,25	0,00	0,00	0,70	0,90
ZBH invierno	La_Brava	27	0,36	0,37	0,00	0,00	0,87	1,39
	La_Punta	18	0,53	0,52	0,00	0,00	1,39	1,42

Fuente: Elaboración propia. ZBDv: densidad de zoobentos volumen (Ind/L); ZBDa: densidad de zoobentos área (Ind/m<sup>2</sup>); ZBS: riqueza taxonómica del zoobentos; ZBH: diversidad del zoobentos.

Tabla 6-82 Resumen comportamiento histórico de las comunidades zooplanctónicas

Indicador/periodo	Laguna	N datos	Promedio	Std	Mínimo	5%	95%	Máximo
ZPD verano	La_Brava	32	9,87	15,62	0,13	0,73	43,35	69,25
	La_Punta	24	41,76	85,60	0,17	0,41	165,83	387,83
ZPD invierno	La_Brava	37	22,71	56,98	0,00	0,12	104,37	294,50
	La_Punta	23	52,39	162,53	0,00	0,00	220,92	762,50
ZPS verano	La_Brava	32	3	1	1	1	5	7
	La_Punta	24	3	1	1	1	5	6
ZPS invierno	La_Brava	37	3	1	0	1	4	6
	La_Punta	23	3	2	0	0	6	8
ZPH verano	La_Brava	27	0,85	0,34	0,29	0,32	1,41	1,49
	La_Punta	21	0,43	0,39	0,00	0,00	1,32	1,34

Indicador/periodo	Laguna	N datos	Promedio	Std	Mínimo	5%	95%	Máximo
ZPH invierno	La Brava	32	0,51	0,33	0,00	0,00	1,02	1,15
	La Punta	20	0,59	0,43	0,00	0,00	1,07	1,27

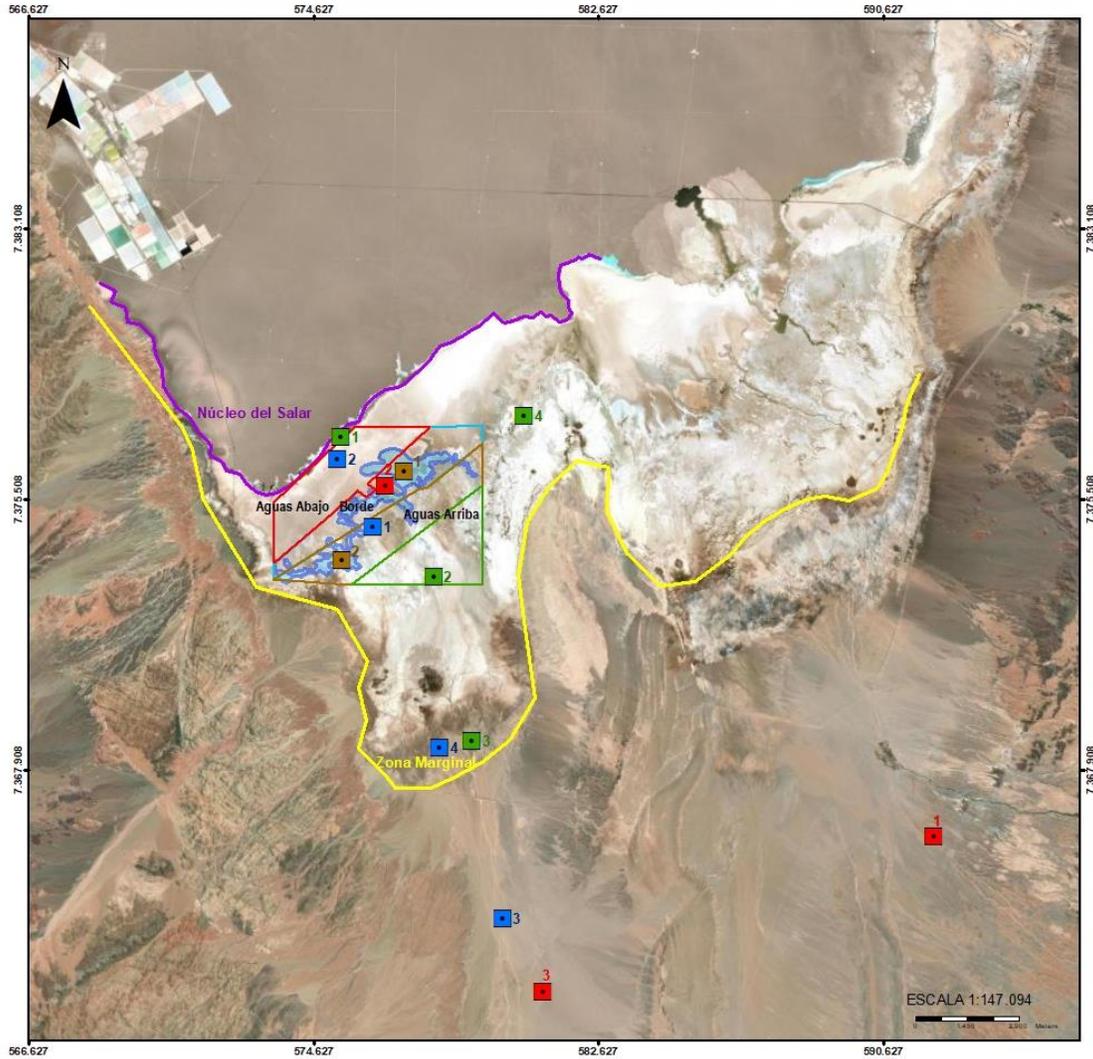
Fuente: Elaboración propia. ZPD: densidad de zooplancton (Ind/L); ZPS: riqueza taxonómica del zooplancton; ZPH: diversidad del zooplancton.

Las comunidades extremófilas microbianas no se utilizaron en este análisis porque no se registraron series temporales con las comunidades cuantificadas para ser evaluadas, sino más bien descripción de comunidades cualitativas o semicuantitativas.

## 7. INDICADORES Y VARIABLES A MEDIR EN EL MONITOREO DE LAGUNAS

Dentro de las variables hidrológicas e hidrogeológicas del tipo abiótica que se han estado monitoreando en el sistema hidrogeológico Salar de Atacama – lagunas La Punta y La Brava, y que han sido incluidos en este estudio, se tienen: temperatura atmosférica, precipitación, evapotranspiración, niveles freáticos, conductividad eléctrica superficial en pozos y laguna, entre otros. Para cada uno los componentes descritos se tienen un registro durante períodos de medición distintos, los que han sido de utilidad al momento de caracterizar y definir el estado ambiental actual de las lagunas, así como la evolución que ha tenido este en el transcurso del tiempo.

Existen componentes a monitorear que pueden ser de utilidad para comprender de mejor manera el funcionamiento del sistema hidrológico e hidrogeológico, sumado a esto, el monitoreo de estos en el tiempo permitirá estimar su variabilidad temporal y evaluar cómo afectan en el estado ambiental de las lagunas La Punta y La Brava.



**NUEVOS PUNTOS DE MONITOREO PROPUESTOS**

**SIMBOLOGÍA**

- Muestreo isotópico de aguas subterráneas
- Medición isotópica de aguas superficiales
- Medición de evapotranspiración
- Estaciones meteorológicas

---

ELABORADO POR AQUIST Y AMAKÁIK PARA LA SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE

**DIAGNOSTICO AMBIENTAL DE LAS LAGUNAS LA PUNTA Y LA BRAVA, SALAR DE ATACAMA.**

DATOS CARTOGRAFICOS  
PROYECCIÓN: UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR, UTM HUSO 19 SUR

DATOS GEODÉSICOS  
DATUM: WGS 1984

FECHA: 23-11-2020

Figura 7-1 Puntos de nuevos puntos de monitoreo propuestos.

Fuente: Elaboración propia

Existen 3 estaciones meteorológicas que miden precipitación, estas son EM-SCL & EM-Rockwood, EM-Peine y EM-Tilopozo. Se propone la instalación de estaciones meteorológicas aguas arriba, en las subcuencas 6-1, 5-2 y 5-1 (

El área de estudio indirecta (Figura 4-1), corresponde a un polígono rectangular alrededor de las lagunas La Punta y La Brava, construido a partir de los vértices de

Tabla 4-1 y de extensión 2658,3133 ha.

) (DGA/GCF, 2010), principalmente en la cuenca aportante al acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT). A partir de esto será posible caracterizar de mejor manera el régimen hídrico del sistema y determinar el gradiente de precipitación a lo largo de la cuenca hidrográfica (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Los puntos de monitoreo de evapotranspiración EVT-19 y EVT-20 se encuentran en el borde de las lagunas, en la zona marginal del salar de atacama. Estos permiten determinar de buena manera la evapotranspiración, sin embargo, existe una gran diferencia en los valores de evapotranspiración entre ambos puntos de medición, registrándose un promedio de 1.398,08 (mm/año) para la estación EVT-19 y para la estación EVT-20 un promedio de 224,21 (mm/año). Esto permite postular que existe variabilidad espacial de la evapotranspiración, al menos en la zona marginal del salar. Por ello, con el objeto de caracterizar de mejor manera este componente, se propone la instalación de puntos de medición de evapotranspiración en el sector del núcleo del salar (aguas abajo de las lagunas), aguas arriba de las lagunas dentro de la misma zona marginal del salar y, además, fuera de la zona del salar (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

La instalación de una estación meteorológica en el borde de la laguna, con medición de, al menos, precipitación, radiación solar y humedad relativa del aire (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) permitirá cuantificar la precipitación caída directamente en la zona de las lagunas y en el borde de éstas, además de permitir el determinar la evaporación desde el espejo de agua en las lagunas.

La caracterización de las aguas mediante isotopos estables ambientales <sup>18</sup>O (oxígeno) y D (deuterio) es de utilidad al momento de definir y caracterizar los distintos componentes de un sistema hidrogeológico. Para esto se propone realizar muestreo de aguas subterráneas aguas arriba de las lagunas, en el borde de éstas, aguas abajo y en aguas superficiales de las mismas lagunas, además de realizar muestreos puntuales de aguas subterráneas en las zonas de interfase agua salobre – salmuera y en la zona de salmuera (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y

). Igualmente, se requiere realizar muestreo de aguas lluvia a distintas alturas topográficas, para todas las estaciones del año, con el objeto de poder construir la línea meteórica local. A partir de esto será posible estimar la evolución tanto de las aguas subterráneas como superficiales, determinar zonas de recarga, posibles recargas laterales, zonas de mezcla, evaporación de aguas, etc.

Como es mencionado en este estudio, en los pozos de monitoreo, tanto aguas arriba, en borde de laguna, como aguas abajo, la medición de niveles estáticos se realiza de forma mensual y solo se reporta un valor por cada mes. Se propone la instalación de sensores de nivel (Diver) para la medición y registro autónomo de niveles de

agua en pozos de monitoreo, con intervalos de medición al menos diarios, y que los reportes sean realizados mediante telemetría. De esta forma será posible tener un registro más completo de la variación de niveles, lo que facilitará el posterior análisis de estos.

Para la estimación de la superficie lagunar y de la superficie de agua en la zona de dilución salina (borde sur del núcleo del Salar), se definen dos polígonos de recorte que marcan los límites de ambas zonas (.

Figura 5-2 Polígonos de recorte de índice NDWI

). Estos límites son definidos de distinta manera en los diversos estudios realizados por las empresas que realizan extracción de recursos hídricos en el sistema. Se propone la definición de dos polígonos que marquen los límites de las lagunas y de la zona de dilución salina, que sean uniformizados para todos los estudios que se realicen, así también, que los datos de superficie lagunar y de superficie de agua en la zona de dilución salina sean presentados de manera separada, con el objetivo de que exista consistencia en los distintos estudios y análisis de estimación de ambas superficies.

Tabla 7-1 Localización de nuevos puntos de monitoreo propuestos

Indicador de monitoreo	N° muestreo o estación	Coordenadas UTM (Datum WGS 84/Huso 19S)	
		UTM E (m)	UTM N (m)
Estación meteorológica	1	592.004	7.366.035
	2	576.630	7.375.893
	3	581.061	7.361.694
Medición de evapotranspiración	1	575.394	7.377.249
	2	577.986	7.373.330
	3	579.071	7.368.718
	4	580.519	7.377.852
Muestreo isotópico de aguas superficiales	1	577.172	7.376.285
	2	575.424	7.373.783

Muestreo isotópico de aguas subterráneas	1	576.298	7.374.747
	2	575.303	7.376.646
	3	579.916	7.363.744
	4	578.167	7.368.537

Fuente: Elaboración propia

En el caso de las aguas superficiales, los parámetros físicoquímicos *in situ* deben ser siempre monitoreados porque son los que resultan más relacionados a las variables respuesta. Son de particular relevancia el pH y la salinidad, tal como indican los resultados de los capítulos 6.3.2.1 y 6.3.2.4. Respecto de los parámetros químicos de calidad de agua, según los resultados, los más relevantes son los macroelementos, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y alcalinidad. Sin embargo, se mantiene la recomendación de considerar como factores relevantes las concentraciones de nutrientes, macroelementos y metales, además de los parámetros *in situ*.

En el caso de las variables respuesta, las comunidades biológicas propuestas deben ser evaluadas en todos los monitoreos, con el mayor nivel posible de resolución taxonómica. En cambio, en el caso de los extremófilos tales como tapetes microbianos y microbialitos, la descripción debe realizarse a nivel de grupos funcionales. Esto porque es el nivel adecuado para formular inferencias ecológicas y el análisis molecular de las comunidades bacterianas que los componen es complejo y no es de amplio uso aún, pese a que existen trabajos relativos al tema, específicamente en la Laguna La Brava, la que cuenta con una detallada descripción de la composición taxonómica de las comunidades bacterianas, investigaciones lideradas por María Eugenia Farías y Manuel Contreras.

## 8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Dentro de los principales objetivos de este informe, está el analizar la evolución de los factores ambientales que controlan o modelan las lagunas La Punta y La Brava, de modo de poder generar un diagnóstico del estado de salud de las lagunas. Las fuentes de información utilizadas para analizar el comportamiento de los factores ambientales son los Estudios de Impacto Ambiental, planes de seguimiento ambiental y planes de alerta temprana pertenecientes a las empresas Albemarle, Minera Escondida, SQM y Compañía Minera Zaldívar. Estas empresas vienen realizando monitoreos ambientales en el sector de las lagunas La Punta y La Brava desde mediados de los años 90 en adelante. También se utilizaron los resultados del proyecto “Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico para la Cuenca del Salar de Atacama”, financiado por el Ex Comité de Minería no Metálica de CORFO y ejecutado por AMAKAIK SpA durante el año 2018. En él se definieron los componentes del modelo ecológico y las variables de estado, forzantes y controladoras para el Salar de

Atacama para cada componente, siguiendo los trabajos de Bilotta & Brazier, 2008; Jones et al., 2011 y Soetaert & Herman, 2009. Una vez definidas las variables que aplican para este estudio, fueron seleccionadas las variables/factores ambientales que cumplieran con las condiciones de: i) que constituyan componentes relevantes del ecosistema, ya sea por su rol forzante de procesos o estructurador de hábitat; ii) que sea medido o monitoreado; iii) que tenga alguna conexión con las fuentes de presión.

Los factores ambientales analizados son: a) Precipitación; b) Temperatura atmosférica; c) Evapotranspiración; d) Nivel freático (piezométrico); e) Nivel lagunar f) Temperatura de aguas superficiales; g) Superficie lagunar (Área de espejo de agua); h) Concentración de nutrientes en aguas superficiales; i) Concentración de macroelementos en aguas superficiales; j) Concentración de metales en aguas superficiales; k) Oxígeno disuelto en aguas superficiales; l) Conductividad/Salinidad en aguas superficiales y m) pH en aguas superficiales.

Se incluyen dentro de este análisis los subcomponentes biológicos a modo de variables respuesta, ya que además pueden ser considerados estructuradores de hábitat. Esto porque los distintos grupos biológicos pueden modificar concentraciones de elementos en el ambiente (nutrientes, oxígeno, etc) y las interacciones entre los distintos grupos pueden modular la dinámica ecosistémica de las lagunas. Las comunidades consideradas son: I) Microorganismos extremófilos; II) Fitobentos; III) Fitoplancton; IV) Zoobentos; V) Zooplancton y VI) Plantas Vasculares Acuáticas. Estas variables son analizadas en función de los parámetros de densidad, riqueza y diversidad, para cada grupo biológico.

## **8.1. Aguas subterráneas y otros factores abióticos**

Dentro de los factores ambientales abióticos determinados para el sistema lagunar La Punta y La Brava, es posible indicar que el nivel lagunar y la superficie lagunar son variables relevantes, ya que son variables que permiten modular de forma directa al sistema. Esto quiere decir que cambios en la superficie de la laguna o en el nivel de las lagunas, incidirán de manera directa en el estado de salud del sistema laguna. Por otra parte, los niveles freáticos resultaron tener importancia media, ya que son medidos en piezómetros de poca profundidad, no permitiendo conocer que pasa con la totalidad de la columna de agua subterránea.

Respecto del comportamiento de los niveles lagunares y niveles freáticos, estos presentan en general variaciones leves, ya sea de aumento o disminución, dependiendo de la ubicación espacial y del período analizado. Las mediciones realizadas en el sector norte del sistema lagunar presentan niveles freáticos más estables, mientras que las mediciones ubicadas en el sector sur de las lagunas muestran variaciones de niveles mayores, mostrando algunos puntos una clara tendencia de descenso de nivel. Del total de puntos de medición

existentes en el sector se puede observar que 4 puntos tienen un aumento leve del nivel, en tanto que 12 puntos muestran una disminución de nivel.

Respecto de la cantidad de información disponible, para los niveles freáticos se contó con una mayor cantidad de datos para el período 2013 – 2019 debido al inicio del monitoreo ambiental de parte de una de las empresas que opera en el sector, la que realizó la instalación de varios piezómetros someros en el sector. Anteriormente solo existían pocos piezómetros para medir los niveles en los alrededores de las lagunas.

Con respecto al factor ambiental niveles lagunares, entre los años 1995 a 2018 para la laguna La Brava, los niveles presentan disminuciones leves, en cambio, para el período entre 2016 a 2019 se evidencian aumentos leves. En tanto para la laguna La Punta, se estimó para el período entre los años 1995 a 2018, una disminución de los niveles, tendencia que se invierte desde el 2018 en adelante.

Los valores de conductividad eléctrica de la superficie de las lagunas presentan aumentos para el período que va entre los años 2016 a 2019 en laguna La Punta, lo que no venía ocurriendo para las mediciones que se iniciaron en 1998.

En relación al factor ambiental superficie lagunar, se realizó un análisis de las superficies mediante imágenes satelitales para el período comprendido entre los años 1985 a 2019. En análisis de la superficie lagunar se realizó por estaciones (verano-invierno, primavera-otoño). En general, los valores de superficie lagunar para cada temporada presentan una tendencia de disminución. Esta tendencia de disminución es mayor durante invierno, seguido de otoño, estimándose para estas dos un cambio porcentual alto de rango entre -78,3% a -59,46%, desde el inicio hasta el final del período. En cambio, durante verano y primavera, los valores presentan una tendencia de disminución menor, siendo el cambio porcentual para éstas, entre -53,09% a -51,53%.

Para la superficie de agua de dilución salina (localizada en el borde sur del núcleo del Salar) se obtuvo a través del análisis estadístico que la tendencia es contraria a la de las superficies lagunares. Se observó una tendencia de aumento no significativo en otoño e invierno, durante el período entre los años 1985 a 2019.

Para completar el análisis de superficie lagunar, se añade que de acuerdo con los mapas de recurrencia de superficie lagunar total y profunda realizados a partir del análisis de imágenes satelitales desde 1985 a 2019, las mayores variaciones tanto de superficie lagunar total y profunda, ocurren en el sector noroeste de la laguna La Punta.

Con respecto a los análisis de las correlaciones estadísticas entre los factores ambientales, se estimó que la relación entre superficie lagunar total y niveles freáticos es baja, debido a que las correlaciones significativas entre estas variables son bajas.

Las correlaciones entre superficie lagunar total y niveles lagunares, desde 1995 a 2018 son levemente mayores.

De acuerdo con el análisis estadístico realizado, el factor modulador más relevante para los niveles freáticos y niveles lagunares sería la temperatura, ya que, las correlaciones con la temperatura de las estaciones meteorológicas Tilopozo y Rockwood-SCL durante el período 2013 a 2018, son en su mayoría altas.

Considerando que la mayoría de los niveles freáticos y niveles lagunares responden negativamente ante variaciones de temperatura, se deben tomar en cuenta los posibles escenarios proyectados por el Centro del Clima y la Resiliencia (CR2) de aumento de temperatura. En ese sentido, según los análisis realizados, la temperatura en la estación meteorológica EM-Tilopozo ha incrementado significativamente en  $0.032^{\circ}\text{C}$  por año, desde 2010 a 2017 ( $r^2=0.27$ , p-valor  $< 0,05$ ) mientras que en EM-Rockwood & EM-SCL ha incrementado significativamente en  $0.108^{\circ}\text{C}$  por año desde 2009 a 2019 ( $r^2=0.38$ , p-valor  $< 0.001$ ).

En relación a la precipitación, se observa que en la EM-Tilopozo los valores mensuales presentan una tendencia de disminución durante el período 2010 a 2017. Por otra parte, en EM-Peine y EM-Rockwood/SCL no se obtuvo un ajuste significativo para los períodos históricos analizados desde 1985 a 2019 y desde 1997 a 2019, respectivamente.

Se estima que existe una relación baja entre los niveles freáticos y niveles lagunares con la precipitación de acuerdo al análisis estadístico, ya que, se obtuvieron pocas correlaciones significativas, siendo bajas, moderadas y negativas, durante el período reciente 2013 a 2018.

Los niveles lagunares y las superficies lagunares son los factores ambientales abióticos más importantes del sistema La Punta y La Brava, siendo la superficie lagunar el factor ambiental que más ha disminuido durante el período histórico analizado desde 1985 a 2019.

En relación con el estado de salud de las lagunas, para sus variables estado niveles freáticos y niveles lagunares, estos permanecen dentro de un rango estable, con disminuciones y aumentos leves, salvo algunas excepciones monitoreadas en el borde de La Punta y en el sector sur de ambas lagunas.

En cambio para la variable superficie lagunar tanto profunda como total, se estimó estadísticamente que su estado ha variado durante el período histórico, desde 1985 a 2019, presentando una tendencia de disminución

alta durante invierno y otoño, y de media a alta en verano y primavera. Esto se da en menor grado para la superficie lagunar profunda.

## **8.2. Aguas superficiales**

De acuerdo con la información recopilada y sistematizada proveniente de Albemarle, ex Rockwood Lithium, y Minera Escondida para las lagunas La Punta y La Brava, se observa que la calidad de las aguas se encuentra dentro de los rangos conocidos para este tipo de ecosistemas. Sin embargo, al evaluar el registro histórico de las variables se aprecia una pérdida de la calidad de ambas lagunas hacia el presente.

En relación a los resultados de caracterización química y física de las aguas superficiales se puede concluir que las condiciones abióticas favorecen el desarrollo de organismos que toleran condiciones extremas de temperatura, pH, conductividad y de concentraciones importantes de sólidos en solución tales como macroelementos, nutrientes y metales. Particularmente en la laguna La Brava, en que la mayoría de los parámetros superan a las concentraciones registradas en La Punta.

Los rangos de temperatura registrados para estas lagunas son muy amplios, debido a que la mayoría de las mediciones de temperatura son realizadas durante el día, por lo que los rangos de temperatura a los que están expuestos los organismos serían incluso mayores a los reportados.

Las lagunas La Brava y La Punta muestran aguas con valores de pH que varían desde neutros hasta moderadamente alcalinos en La Brava y desde moderadamente ácidos hasta moderadamente alcalinos en La Punta, según la clasificación de Hounslow (1995). También destacan amplios rangos de oxígeno disuelto, presentando concentraciones inferiores a 6 mg/L, las que son consideradas por la literatura como no aptas para la preservación de la biota acuática, (Nodarse and Montalvo, 2010). Otra característica importante en estos cuerpos de agua son las elevadas conductividades características de concentraciones altas de sólidos totales disueltos, registrando La Brava conductividades muy superiores a La Punta, tal como ya discutía CEA en el Plan de Manejo Biótico de Albemarle (2015).

Respecto a los valores señalados de salinidad a lo largo del período estudiado, estos indican que las aguas de la laguna La Brava son clasificadas desde salinas a hipersalinas de acuerdo a sus concentraciones de sólidos totales disueltos, mientras que las de la laguna La Punta son consideradas desde hiposalinas hasta salinas, según la clasificación de salinidad de cuerpos de agua establecida en Davis et al., 2003. Resultado consistente con las conductividades registradas, dada la alta correlación entre ambos parámetros.

Las características de estas aguas es que son dinámicas y heterogéneas en el espacio y el tiempo, habiéndose presentado aguas desde hiposalinas hasta hipersalinas en estos sistemas. Por lo general, mayoritariamente se trata de condiciones de hipersalinidad.

Respecto a la composición iónica predominante en las aguas de La Punta y La Brava es clorurada sódica, presentándose en ambas lagunas elevadas concentraciones de los elementos boro, litio y arsénico.

Las series temporales de los parámetros *in situ*, muestran que los valores para todas las variables son sostenidamente mayores para La Brava, pero que consecuentemente, a partir de 2016/2017, los valores de La Punta se tornan mayores con una tendencia al incremento, exceptuando al oxígeno disuelto que disminuye. En tanto, las series temporales de sólidos totales disueltos, carbonatos y sulfatos también tienden a ser mayores en La Brava, aunque con la clara distinción de la variable alcalinidad, cuyos valores son mayores para La Punta. Lo más notable de este conjunto de series es la progresiva (abrupta en el caso de bicarbonato) disminución de concentración en torno a 2004-2006 hacia adelante. Esto coincide con la disminución en la tasa de precipitaciones entre 2004 y 2010. A partir de 2010 algunas concentraciones tienden a aumentar levemente en concordancia con precipitaciones más frecuentes e intensas.

Respecto de las correlaciones entre variables químicas se destacan los parámetros *in situ*, mostrando correlación entre variables tales como salinidad y conductividad, temperatura y oxígeno disuelto, entre otros que refuerzan la utilización de estos parámetros para determinar la calidad de las lagunas ya que se relacionan además con los procesos biológicos que se desarrollan al interior de cada laguna. Los macroelementos muestran las más altas correlaciones al interior de las lagunas, lo que tiene sentido químico, sin embargo, se registran numerosas correlaciones de parámetros entre las lagunas, no lográndose establecer un vínculo entre los mecanismos químicos que pudieran explicar dichas correlaciones.

En cuanto a las comunidades biológicas, se observó presencia abundante de copépodos calanoideos identificada *Boeckella* (Daday, 1902), las cuales habitan condiciones ambientales extremas como alta exposición a la radiación solar y altos niveles de salinidad y condiciones extremas de temperatura. Se ha descrito que los niveles de salinidad son un importante factor regulador de las estructuras comunitarias del zooplancton, determinando una baja riqueza de especies (De Los Ríos & Crespo, 2004), encontrándose una relación inversa entre la salinidad y la riqueza de zooplancton.

Además, se estimó un marcado predominio de copépodos tanto Cyclopoideos como Harpacticoideos (*Atteyella* sp). Es importante destacar la presencia de harpacticoideos principalmente de la familia Canthocamptidae del

género *Attheyella* Brady 1880, el cual es un taxón de amplia distribución geográfica (Hadel, 1986). Este género junto con sus copepoditos, están presentes en casi todos los sistemas lagunares salinos e hipersalinos.

Finalmente, la comunidad zooplanctónica podría ser afectada mayormente por parámetros como la temperatura, el oxígeno disuelto, el pH, la salinidad y otros sólidos disueltos que producen cambios en la calidad de agua de las lagunas. Pese a este patrón general y a que las lagunas La Punta y La Brava presentan diferencias en su calidad físicoquímica, el zooplancton no registra diferencias significativas entre lagunas para los parámetros de densidad, riqueza y diversidad. Un factor importante a considerar en este tipo de análisis es la baja cantidad de entidades taxonómicas registradas en general y el nivel de resolución taxonómica menor respecto de otros grupos como las microalgas, lo que se refleja en comunidades aparentemente más homogéneas. Por su parte, el zoobentos es una comunidad que, al igual que el zooplancton, presenta baja cantidad de entidades taxonómicas, las que son determinadas a nivel de familia o género, por lo que también se muestra una composición homogénea. En este caso, el zoobentos muestra una disminución de la diversidad, forzado principalmente por una disminución muy importante de la densidad de individuos pese a un aumento en su riqueza.

En el caso de las microalgas, tanto en las comunidades bentónicas como planctónicas, domina la clase Bacillariophyceae (diatomeas). Este grupo es muy diverso, particularmente en sistemas hipersalinos de altura, lo que es registrado por los monitoreos en el sistema La Punta y La Brava. Cabe señalar que este grupo se encuentra también formando parte de los microorganismos extremófilos, considerados como la principal comunidad biológica estructuradora de hábitat en este tipo de ecosistemas. El fitoplancton, al igual que el zooplancton, no registra diferencias significativas entre lagunas para ninguno de los parámetros considerados, sin embargo, el fitobentos presenta diferencias significativas para la riqueza taxonómica y diversidad entre las lagunas La Punta y La Brava. Cabe señalar que en general la tendencia de las series temporales de las comunidades microalgales es negativa para la diversidad del fitobentos y la riqueza y diversidad del fitoplancton en ambas lagunas. A pesar de esta tendencia significativa el segundo semestre de 2018 y el primer semestre de 2019 particularmente el fitoplancton muestra un interesante aumento respecto del resto de la serie temporal.

Las correlaciones entre comunidades biológicas microalgales muestran patrones inversos para la Laguna La Punta y Laguna La Brava respecto de su diversidad. La diversidad del fitoplancton y fitobentos de La Punta presentan una alta correlación negativa significativa, en cambio la diversidad del fitoplancton y fitobentos de la laguna La Brava muestran una alta correlación positiva significativa. En cambio, las comunidades de invertebrados bentónicos y planctónicos muestran en la laguna La Punta solo correlaciones negativas entre algunos parámetros de los otros grupos biológicos, por ejemplo, la densidad del zoobentos se correlaciona

negativa y significativamente con la riqueza y diversidad del fitoplancton, la riqueza del zoobentos negativa y significativamente con la diversidad del fitoplancton, la riqueza y diversidad del zooplancton negativa y significativamente con la diversidad del fitoplancton y con la densidad del zoobentos. Estas correlaciones negativas son explicadas por interacciones biológicas de depredación y competencia entre las comunidades, por lo que tiene total sentido ecológico. Sin embargo, en La Brava se registran algunas correlaciones positivas significativas entre las comunidades, por ejemplo, la densidad del zoobentos con la densidad del fitobentos y la riqueza del fitoplancton y también la correlación positiva de la diversidad y riqueza del zooplancton con la densidad del fitobentos. Estas correlaciones podrían deberse al mayor desarrollo de tapetes microbianos en la Laguna La Brava, el que concentra una gran cantidad de microalgas bentónicas aumentando la disponibilidad de alimento.

Fueron realizados dos análisis multivariados, ACP y CCA. Como resultado del ACP es posible reconocer cuatro asociaciones de variables. El primero consta de valores negativos asociados a observaciones de invierno y corresponde a mayor nivel lagunar, nivel freático y oxígeno disuelto. El grupo de variables opuesto al primero se asocia con observaciones de verano y consta de mayor conductividad, temperatura, precipitación, superficie de dilución salina, concentración de carbonato (La Brava), e ion cloruro (La Brava). Un tercer grupo consta de variables tales como superficie lagunar total, concentración de bicarbonato, sólidos totales suspendidos y concentración de amonio. Finalmente, el cuarto grupo contempla las variables sulfato, cloruro y carbonato de La Punta, nivel lagunar LP08, nitratos y nitritos y alcalinidad de La Punta. El primer componente principal está siendo influenciado por procesos relacionados con fluctuaciones en temperatura y evapotranspiración, de modo que el nivel de las lagunas es un importante modulador de las variables fisicoquímicas a medida que responde a los cambios intraanuales e interanuales de temperatura. En tanto, se podría postular que procesos biológicos asociados al nivel de las lagunas, podrían estar modulando las variables segregadas por el segundo componente principal, el que es más complejo de descifrar ya que solo explica un 15.1% de la varianza y separa variables sin una relación directa. Esto porque el desarrollo biológico se asocia en general a valores negativos del segundo componente principal.

El CCA muestra componentes influenciados por las variables asociadas a los primeros componentes del ACP. De los resultados observados es posible concluir para las comunidades biológicas que tanto la densidad, diversidad y riqueza del fitobentos y fitoplancton se ven favorecidos por condiciones “invernales”, o de mayor nivel agua, mientras que condiciones tipo-verano favorece la densidad, diversidad y riqueza del zooplancton.

Respecto de las condiciones de referencia, se utilizaron distintos criterios para las variables hidrogeológicas y para las variables de las lagunas superficiales. En el primer caso se tomó como criterio base el establecido en

la Sección XII “Observaciones al Anexo III: Plan de contingencia modificado”, de la Adenda II- EIA Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama de SQM, cuyo principio es mantener el sistema dentro de su variación histórica, para lo cual se tomó como condición de referencia el penúltimo valor más bajo de la data histórica disponible por estación (verano e invierno), para los puntos de monitoreo de niveles lagunares. En cambio, para las variables físicoquímicas *in situ* y de laboratorio de las lagunas se utilizó el criterio de fijar como valores de referencia superior e inferior los que limitan la distribución del 90% de los datos de cada parámetro (5% y 95%), separados en inviernos y veranos para cada laguna. Esto porque en muchos casos 2 desviaciones estándar superaban los mínimos y máximos registrados, y porque estos valores extremos se ven influenciados por múltiples factores que puedan provocar *outliers*. **Cabe destacar que estos valores operacionales de referencia tienen muchos supuestos implícitos por lo que se recomienda utilizar con precaución. Esto porque para establecer valores de referencia con alto nivel de confianza es necesario realizar monitoreos sistemáticos a un conjunto de lagunas de similares características con metodologías estandarizadas de muestreo y análisis, estacionalmente y por un tiempo prolongado para evaluar su variabilidad interanual.**

**En el caso de las variables bióticas se recomienda utilizar la composición taxonómica como referencia siempre y como complemento monitorear los indicadores comunitarios** que tienen un enfoque más conservacionista y no son necesariamente indicadores de salud del ecosistema. Esto porque, tal como se explicó en el capítulo correspondiente, es posible encontrar una alta diversidad, con altas densidades de un alto número de especies que responden favorablemente a perturbaciones que implican una mala calidad. Pese a ello se entregan las tablas con los valores que, al igual que en los parámetros físicoquímicos, delimitan el 90% de distribución de los datos obtenidos para los tres parámetros que se evalúan regularmente y que deben siempre complementar el análisis de la composición taxonómica de las comunidades biológicas.

Por todo lo antes expuesto, es posible concluir que las lagunas La Punta y La Brava muestran un deterioro en su calidad ambiental, disminuyendo los espejos lacustres, la disponibilidad de agua y desmejorando su calidad físicoquímica, lo que repercute en una pérdida de diversidad de las comunidades biológicas. Se requiere robustecer el monitoreo en el tiempo, extendiendo el rango temporal en las estaciones de muestreo históricos, considerando una estandarización en las metodologías de muestreo y análisis de las distintas variables propuestas como forzantes y de las variables respuesta propuestas en este estudio.

## 9. REFERENCIAS

- Amakaik, 2018. Estudio de un modelo conceptual ecológico para la cuenca del Salar de Atacama. Proyecto Financiado por Minería No Metálica, CORFO. Santiago de Chile, Chile.
- Araya, J., Zuñiga, L. 1985. Manual taxonómico del zooplancton lacustre de Chile. Boletín Informativo Limnológico. Valdivia Chile. Pág. 110.
- Arango, M., Branch, J., Botero, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: "Landsat-ETM+". Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín.Vol.58, No.1. pp.2624-2625.
- Arocena, R. Conde, D. 1999. Métodos en ecología de aguas continentales con ejemplos de Limnología en Uruguay. DI.R.A.C. - Facultad de Ciencias. Universidad de la República, Uruguay 233.
- APHA, AWWA, WEF. Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. Washington DC: American Public Health Association, 1995.
- Bilotta, S. A., & Brazier, R. E. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and biota. Water Res, 42, 2849–2861.
- CEA, 2015. Anexo 2: Plan De Manejo Biótico. In Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama, Región de Antofagasta (pp. 1–158).
- CEDREM, 2017. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Informe N°2 Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico 2016. Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA N°21/2016 (pp. 20-25).
- Chapman, M.A., Burns C.W. 1976. Sexual and other differences in copepodite stages of some New Zealand *Calamoecia* and *Boeckella* spp. (Copepoda: Calanoida). New Zealand Journal of marine and Freshwater research 10 (1) 131-137.
- Chavez, P. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62, 1025-1036.
- Congedo Luca (2020). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation.
- DGA & GCF, 2010. Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. II Región (pp. 26).
- Davis, J.A., Mcguire, M., Halse, S.A., Hamilton, D., Horwitz, P., McComb, A.J., Froend, R.H., Lyons, M., Sim, L. (2003). What happens when you add salt: predicting impacts of secondary salinization on shallow aquatic ecosystems by using alternative states model. Australian Journal of Botany 51, 715-724.

- De los Ríos, P. & Zúñiga, O. 2000. Comparación biométrica del lóbulo frontal en poblaciones americanas de *Artemia* (Anostraca, Artemiidae). *Revista Chilena de Historia Natural* 73(1):31-38.
- De los Ríos, P., Crespo J.E., 2004. Salinity effects on the abundance of *Boeckella poopoensis* (Copepoda, Calanoida) in saline ponds in the Atacama Desert, northern Chile. *Crustaceana*, 77: 417-423.
- De los Ríos, P., Salgado, I. 2012. *Artemia* (Crustacea, Anostraca) in Chile: a review of basic and applied biology. *Latin American Journal of Aquatic research* 40: 487-497.
- De los Ríos-Escalante, P. 2010. Crustacean Zooplankton Communities in Chilean Inland Waters. *Crustaceana Monographs*, 12. Koninklijke Brill NV, Leiden.
- De los Ríos-Escalante, P., Meruane, J., Morales, M.C., Rudolph, E., Fuentealba, C., Boxshall G. 2013. Zoogeography of Chilean inland water crustaceans. *Latin American journal of aquatic research*, 41: 846-853.
- Derry, A.M., Hebert P.D.N., Prepas, E.E. 2003. Evolution of rotifers in saline and subsaline lakes: A molecular phylogenetic approach. *Limnology & Oceanography*, 48: 675-685.
- Dorador, C., Pardo, R. Vila, I. 2003. Variaciones temporales de parámetros físicos, químicos y biológicos de un lago de altura: el caso del lago Chungará. *Revista Chilena de Historia Natural*, 76: 15-22.
- GANNON, J.E. & R.S. STEMBERGER. 1978. Zooplankton (especially crustaceans and rotifers) as indicators of water quality. *Trans. Amer. Microsc. Soc.* 97:16.
- Geomática Ambiental, s.f. Característica Landsat 4,5, 7 y 8. Especialista teledetección con Arcgis.
- Guzmán, J.A., Sielfeld W., 2009. Dieta de *Orestias agassii* (cuvier & valenciennes, 1846) (Teleostei: Cyprinodontidae) del salar del Huasco, norte de Chile. *Gayana*, 73: 17-27.
- Hadel, V.F., 1986. Two new species of *Attheyella* (Copepoda: Harpacticoida: Canthocamptidae) from Bromeliads of the Serra Da Jureia (Sao Paulo, Brasil). *Journal of Crustacean Biology* 6: 777-778.
- Hounslow, A. (1995). *Water quality data analysis and interpretation*. Lewis Publishers. United States of America.
- Hurlbert, S.H., Loayza, W., Moreno, T. 1986. Fish-flamingo-plankton interactions in the Peruvian Andes. *Limnology & Oceanography*, 31: 457-468.
- Jaksic, F. 1997. *Ecología de los vertebrados de Chile*. Primera edición. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 262 pp.

- Jones, N., Ross, H., Lynam, T., Perez, P., & Leitch, A. (2011). Mental models: an inter- disciplinary synthesis of theory and methods. *Methods. Ecol*, 16, 1–46.
- Nodarse, I.C. & Montalvo, S. (2010). Agua calidad y contaminación. Desde un enfoque Químico Ambiental.
- Moya, C., Rojas, C., Herrera, C., & Troncoso, R. (2009). Caracterización hidroquímica de las aguas superficiales del Río Huasco. *Santiago*, 22, S1\_022.
- Moya, C., Rojas, C., Herrera, C., & Troncoso, R. (2009). Caracterización hidroquímica de las aguas superficiales del Río Huasco. *Santiago*, 22, S1\_022.
- Pennak RW. *Fresh-water invertebrates of the United States. Protozoa to Mollusca.* 3rd edition. Wiley. 1989
- Peña, H., Grilli, A., Salazar, C., Orphanopoulos, D., Suzuki, O., Aravena, R., Rauer A., (1989) Isotope hydrology investigation, area of the Salar de Llamara, Atacama Desert, Chile. (IAEA-TECDOC--502). International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Minera Escondida Ltda. (2019). Anexo G, Análisis de las imágenes satelitales. Plan de Alerta Temprana para Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (pp.11-50).
- Pramar ambiental (s, f). Sección XII Observaciones al Anexo III: Plan de contingencia modificado. Adenda II EIA Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama (pp.120-125).
- Ramírez, A. y Viña, G., 1998. *Limnología colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de Análisis*, BP Exploration - Univ. Jorge Tadeo Lozano, Santafé de Bogotá.
- ROLDAN, G., 2003.- Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: Uso del método BMW'P/ Col. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín. 1era. Edición. pp. 1-Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: Uso del método BMW'P/ Col. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín. 1era. Edición. pp. 1-170.
- Sánchez, J. (s, f). Correlación lineal y regresión. Departamento Geología Universidad Salamanca. Recuperado de <http://web.usal.es/javisan/hidro>
- SEA (2012). Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA (pp.61).
- Szmidt, E., & Kacprzyk, J. (2011). The Spearman and Kendall rank correlation coefficients between intuitionistic fuzzy sets. *European Society for Fuzzy Logic and Techonology*, (October 2014), 521–528. <https://doi.org/10.2991/eusflat.2011.85>
- Soetaert, K., & Herman, P. M. J. (2009). *A Practical Guide to Ecological Modelling.* Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8624-3>
- Villalobos, L. 2006. Estado del conocimiento de los crustáceos zooplanctónicos dulceacuícolas de Chile. *Gayana* 70: 31-39.

Willamson, C.E., Reid, J.K. 2001. Copépoda. En: Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates, Thorp J.H. & Covich A.P. Editores, 2° ed. Pág: 915-951. Academic Press. San Diego, California. Estados Unidos.

Zúñiga, O.; Wilson, R.; Amat, F. & Hontoria, F. 1999. Distribution of Chilean populations of the brine shrimp *Artemia* (Crustacea, Branchiopoda, Anostraca). International Journal of Salt Lake Research 8(1):23-40.

## **10. ANEXOS**

Anexo I Bases de datos de componentes Bióticos y Abióticos

Anexo II Documentos a utilizar (actualizado)

Anexo III Biblioteca de Imágenes Satelitales

Anexo IV SIG

Anexo V Minutas de reuniones