

Anexo C

Superficie Cubierta por Lagunas

Anexo C-1

Informe “Superficie Cubierta por Lagunas, Invierno 2023 – Verano 2023”



INFORME ANUAL N°8

Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH)

Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016)”

Superficie Cubierta por Lagunas

Invierno – Verano

2023



Región de Antofagasta

Marzo de 2023

ÍNDICE

1	RESUMEN.....	10
2	INTRODUCCIÓN.....	13
3	OBJETIVOS	15
4	MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
4.1	Descripción del área de estudio	16
4.2	Parámetros utilizados para caracterizar el estado y seguimiento de los cuerpos de agua	19
4.3	Ubicación de los puntos de muestreo para validación de cuerpos de agua	19
4.4	Materiales y equipos utilizados.....	21
4.5	Metodología de muestreo y/o medición.....	25
4.6	Metodología de análisis de las imágenes satelitales para delimitación de cuerpos de agua	25
4.6.1	Imágenes de alta resolución – Pleiades 1-A	25
4.6.2	Imagen de resolución media – LANDSAT 8.....	29
4.6.3	Procesamiento de las imágenes satelitales.....	30
4.6.4	Descripción del modelo de clasificación supervisada de cuerpos de agua	31
4.6.5	Parámetros espectrales del modelo de clasificación	32
4.6.6	Umbrales y validación del modelo de clasificación.....	34
4.6.7	Depuración cartográfica de cuerpos de agua.....	37
4.7	Análisis comparativo para seguimiento de la cobertura de cuerpos de agua.....	38
4.8	Fechas de medición	39
5	RESULTADOS	39
5.1	Validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua.....	39
5.2	Resultados Superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar.....	45
5.2.1	La Punta - La Brava	47
5.2.2	Peine	54
5.2.3	Aguas de Quelana.....	61
5.2.4	Soncor	68
5.3	Límites considerados en el seguimiento de los cuerpos de agua	75
6	DISCUSION.....	75

6.1	Análisis de la validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua	75
6.2	Análisis de comparación con registros históricos	77
6.2.1	Sistema Lagunas La Punta - La Brava.....	80
6.2.2	Sistema Lagunas Peine.....	87
6.2.3	Sistema Aguas de Quelana.....	96
6.2.4	Sistema Soncor	102
7	CONCLUSIONES.....	108
8	REFERENCIAS	112
9	ANEXOS	117
	ANEXO 9-1. Distribución de puntos de validación para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, invierno 2023.....	117
	ANEXO 9-2. Distribución de puntos de validación para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, verano 2023.	118
	ANEXO 9-3. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector sur, invierno 2023.....	119
	ANEXO 9-4. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, verano 2023.	120
	ANEXO 9-5. Coordenadas de puntos de validación en terreno	121
	ANEXO 9-6. Cuadro comparativo de diferencias implementadas en el estudio actual respecto a Adenda 5 RWL (2015).....	121
	ANEXO 9-7. Metadata de Imágenes de alta resolución – Pleiades 1-A.....	122
	ANEXO 9-8. Metadata de Imágenes de media resolución – Landsat	122
	ANEXO 9-9. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Landsat 8, invierno 2023.	123
	ANEXO 9-10. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2023.....	124
	ANEXO 9-11. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Landsat 8, invierno 2023	125
	ANEXO 9-12. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2023	126
	ANEXO 9-13. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Landsat 8, invierno 2023.	127
	ANEXO 9-14. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2023.....	128
	ANEXO 9-15. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Landsat 8, invierno 2023	129

ANEXO 9-16. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2023.....	130
ANEXO 9-17. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Landsat 8, verano 2023.....	131
ANEXO 9-18. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Pleiades 1-A, verano 2023.	132
ANEXO 9-19. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Landsat 8, verano 2023	133
ANEXO 9-20. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Pleiades 1-A, verano 2023.....	134
ANEXO 9-21. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Landsat 8, verano 2023.....	135
ANEXO 9-22. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A, verano 2023.	136
ANEXO 9-23. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Landsat 8, verano 2023.....	137
ANEXO 9-24. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Pleiades 1-A, verano 2023.....	138
ANEXO 9-25. Imágenes Landsat 2016 – 2023 – Análisis NDWI.	139

FIGURAS

Figura N°4-1. Ubicación sistemas lagunares que conforman el área de estudio para monitoreo y seguimiento de la cobertura de cuerpos de agua por parte del Proyecto en el Salar de Atacama.....	18
Figura N°4-2. Imagen UVA/dron, sector La Punta – La Brava, verano 2023.....	22
Figura N°4-3. Imagen UVA/dron, sector Aguas de Quelana, verano 2023.....	23
Figura N°4-4. Imagen UVA/dron, sector Soncor (vuelo parcial sector sur Barros Negros), verano 2023.	24
Figura N°4-5. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades 1-A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama, invierno 2023.....	27
Figura N°4-6. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades 1-A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama verano 2023.....	28
Figura N°4-7. Imagen Landsat 8 correspondiente al cuadrante que incluye el área de estudio en invierno 2023 (izquierda – RGB) y verano 2023 (derecha - RGB)	29
Figura N°4-8. Modelo conceptual de árbol de decisiones usado para la clasificación supervisada de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales	31
Figura N°4-9. Diagrama del proceso de transformación y depuración de imágenes formato de cobertura continua (<i>raster</i>) a polígonos (<i>shape</i>).	38

Figura N°5-1. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar La Punta - La Brava.	47
Figura N°5-2. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar La Punta - La Brava, agosto 2023 – diciembre 2023.....	49
Figura N°5-3. Registros de superficies lagunares de seguimiento (inviernos 2016 a 2023), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1-A.....	50
Figura N°5-4. Registros de superficies lagunares de seguimiento (inviernos 2016 a 2023), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.....	51
Figura N°5-5. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1-A.	52
Figura N°5-6. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.....	53
Figura N°5-7. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar Peine.....	54
Figura N°5-8. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Peine, agosto – diciembre 2023.....	56
Figura N°5-9. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1-A.....	57
Figura N°5-10. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.....	58
Figura N°5-11. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1-A.	59
Figura N°5-12. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.....	60
Figura N°5-13. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua sistema lagunar Aguas de Quelana	61
Figura N°5-14. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Aguas de Quelana, agosto – diciembre 2023.....	63
Figura N°5-15. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Aguas de Quelana, a partir de Pleiades 1-A.....	64
Figura N°5-16. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Aguas de Quelana, de imágenes Landsat 8	65
Figura N°5-17. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A.	66
Figura N°5-18. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), sector Aguas de Quelana, Landsat 8.....	67
Figura N°5-19. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar Soncor.	68
Figura N°5-20. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Soncor, agosto – diciembre 2023	70
Figura N°5-21. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1-A.....	71
Figura N°5-22. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8	72

Figura N°5-23. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos(diciembre 2016 a 2023), sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1-A.....	73
Figura N°5-24. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos(diciembre 2016 a 2023), sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8	74
Figura N°6-1. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector La Punta - La Brava.....	81
Figura N°6-2. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector La Punta - La Brava.....	82
Figura N°6-3. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector La Punta - La Brava.....	84
Figura N°6-4. Variación histórica Sistema Lagunar La Punta-La Brava, Landsat NDWI (1985-2023). 86	
Figura N°6-5. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar La Punta - La Brava.....	87
Figura N°6-6. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine	89
Figura N°6-7. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Peine.....	90
Figura N°6-8. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine	92
Figura N°6-9. Variación histórica Sistema Lagunar Peine, Landsat NDWI (1985-2023)	94
Figura N°6-10. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Peine	95
Figura N°6-11. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Aguas de Quelana.....	97
Figura N°6-12. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Aguas de Quelana	98
Figura N°6-13. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Aguas de Quelana.....	100
Figura N°6-14. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Aguas de Quelana.....	101
Figura N°6-15. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor.	103
Figura N°6-16. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Soncor.	104
Figura N°6-17. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor.....	106
Figura N°6-18. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Soncor.....	107

TABLAS

Tabla N°2-1. Resumen de Componentes y Variables	14
Tabla N°2-2. Identificación de instituciones y/o equipos de trabajo encargados de realizar el muestreo, medición, análisis y/o control	14
Tabla N°4-1. Número de puntos de monitoreo catastrados en la campaña de invierno 2023, para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama	20
Tabla N°4-2. Número de puntos de muestreo catastrados en la campaña de verano 2023, para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama	21
Tabla N°4-3. Características técnicas del sensor Pleiades 1-A.....	26
Tabla N°4-4. Características técnicas de las bandas espectrales de la imagen Landsat 8.....	29
Tabla N°4-5. Valores de los umbrales de clasificación de los parámetros espectrales usados, según Pleiades 1-A y Landsat 8, para la delimitación de cuerpos de agua en los sistemas lagunares del Salar de Atacama, agosto y diciembre de 2023.....	35
Tabla N°5-1. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1-A: Matriz de confusión y el índice <i>Kappa</i> por sistema lagunar. Agosto, 2023	41
Tabla N°5-2. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Landsat 8: Matriz de confusión y el índice <i>Kappa</i> por sistema lagunar. Agosto, 2023.....	42
Tabla N°5-3. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1-A: Matriz de confusión y el índice <i>Kappa</i> por sistema lagunar. Diciembre de 2023.	43
Tabla N°5-4. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Landsat 8: Matriz de confusión y el índice <i>Kappa</i> por sistema lagunar. Diciembre de 2023	44
Tabla N°5-5. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y datos obtenidos en el monitoreo 2023 (invierno y verano), respecto de los registros históricos (Adenda 5 RWL, 2015)	45
Tabla N°5-6. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales Landsat 8 y datos obtenidos en el monitoreo 2023 (invierno y verano), respecto de los registros de la Adenda 5 RWL (2015).....	45
Tabla N°6-1. Consolidado de índices <i>Kappa</i> de validación del modelo de clasificación para imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8.....	76
Tabla N°7-1. Superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales (alta y media resolución) y datos obtenidos en el monitoreo 2023 (invierno y verano), respecto de los registros de históricos (Adenda 5 RWL, 2015).....	108

1 RESUMEN

Este análisis se desarrolla en cumplimiento a los compromisos ambientales y procedimientos asumidos en el marco del Plan de Seguimiento Ambiental y Plan de Alerta Temprana de los Recursos Hídricos (PSAH), en adelante Plan de Seguimiento Hídrico o PSAH, correspondientes a la RCA N°21/2016 que aprueba el Proyecto “**Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama, Región de Antofagasta – Rockwood Lithium**” (En adelante Albemarle) (ALB), para el monitoreo de “Superficie Cubierta por Lagunas”.

El propósito es realizar el seguimiento de la cobertura de los cuerpos de agua, a través de imágenes satelitales, en cuatro sistemas lagunares del Salar de Atacama que conforman el área de estudio: (1) La Punta - La Brava, (2) Peine, (3) Aguas de Quelana y (4) Soncor. Para tal fin, se utilizan imágenes de alta resolución del sensor Pleiades 1-A y de mediana resolución de acceso público del sensor Landsat 8, obtenidas en invierno y verano de 2023.

Las etapas metodológicas empleadas durante la campaña y análisis correspondieron a:

- i) Trabajo en terreno/fotointerpretación para revalidación estacional de puntos de monitoreo registrados en las campañas 2023 y anteriores, clasificando el recubrimiento de suelo en dichos puntos como “*cuerpos de agua*” u “*otros recubrimientos*”;
- ii) Obtención y procesamiento de las imágenes satelitales en forma paralela a las campañas de terreno;
- iii) Desarrollo y validación del modelo de clasificación supervisada, para determinar umbrales de clasificación de los parámetros espectrales NDWI, NDVI, NIR, Transformada *Tasseled Cap* “*Wetness*” y Algebra de bandas espectrales en alta resolución; seguido por una depuración cartográfica, obteniendo de esta forma las coberturas de lagunas por sector.

Durante la campaña de invierno de 2023 no fue posible llevar a cabo la validación *in situ* debido a las medidas de restricción de movilidad aplicadas por la Comunidad de Peine; estas medidas limitaron el traslado y acceso a los sectores de Peine y La Punta – La Brava. En cuanto a la campaña de verano de 2023, la validación *in situ* programada no pudo llevarse cabo en los sectores de Peine y Soncor (solamente fue muestreada una porción de la zona sur de Barros Negros). Las medidas de restricción de movilidad implementadas por la Comunidad impidieron el traslado y acceso al sector de Peine en el verano 2023; además, en el sector Soncor, las autoridades restringieron el acceso en el área de la Reserva Nacional Los Flamencos debido a la anidación de flamencos. En ambas campañas las posibilidades de revalidación de los puntos de muestreo, fue realizada mediante fotointerpretación en gabinete con imagen de alta resolución.

Los valores de ajuste se obtuvieron mediante el índice *Kappa*¹, este índice tuvo una variación entre 0,89 y 0,40 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y desde 0,94 y 0,41 para imágenes de resolución media Landsat 8 en agosto de 2023. Respecto de diciembre de 2023, este índice tuvo una variación entre 0,82 y 0,46 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y desde 0,83 a 0,47 para imágenes de resolución media Landsat 8. Todos los valores antes indicados muestran una alta precisión del modelo de clasificación supervisada aplicado, que según el índice *Kappa* muestra un nivel de concordancia *moderado a casi perfecta*².

Las superficies lagunares estimadas en este monitoreo desde imágenes de alta resolución, en invierno de 2023 correspondieron a: (1) 45,5 ha en La Punta - La Brava, (2) 29,4 ha en Peine, (3) 18,9 ha en Aguas de Quelana, y (4) 177,3 ha Soncor; y para verano de 2023 las superficies son: (1) 26,6 ha en La Punta - La Brava, (2) 22,0 ha en Peine, (3) 5,9 ha en Aguas de Quelana y (4) 112,9 ha Soncor.

Las superficies lagunares estimadas en este monitoreo desde imágenes de media resolución, en invierno de 2023 correspondieron a: (1) 39,4 ha en La Punta - La Brava, (2) 62,2 ha en Peine, (3) 28,8 ha en Aguas de Quelana, y (4) 219,7 ha Soncor; y para verano de 2023 las superficies son: (1) 28,8 ha en La Punta - La Brava, (2) 26,9 ha en Peine, (3) 13,0 ha en Aguas de Quelana y (4) 119,1 ha Soncor.

En relación con el análisis comparativo entre las imágenes satelitales, La correlación entre las superficies calculadas a partir de imágenes de alta resolución (Pleiades 1-A) y de media resolución (Landsat), evaluada mediante el coeficiente de correlación de Pearson, revela una relación positiva en todos los sectores. La correlación exhibe niveles que varían de *alta a moderada*. Los valores de *p* indican que hay evidencia estadística significativa de la asociación entre las superficies asociadas a Pleiades y Landsat. Este análisis indica que en la mayoría de los sectores existe una conexión entre los resultados obtenidos de imágenes de alta resolución y media resolución. Las principales disparidades se atribuyen a la resolución espacial de las imágenes de media resolución. Estas generan modelos con bordes menos definidos en comparación con los modelos de alta resolución, que presentan una mayor nitidez en los contornos de los recubrimientos debido a la mejora del contraste y la respuesta espectral. A pesar de las diferencias en la magnitud de los valores, se observa una relación directa, es decir, valores altos en una variable se corresponden con valores altos en la otra, y viceversa para valores bajos.

En relación con la evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie semestral PSAH), superficies históricas serie Adenda 5 RWL (1972 – 2014) y serie complementaria 2016 – 2023, se tiene que las superficies calculadas con imágenes de media resolución Landsat (de frecuencia semestral) durante el monitoreo 2016 a 2023, como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI, en todos los sectores de estudio, tanto en las superficies de invierno y verano. En todos los sectores de estudio se observa que la máxima extensión de la superficie de los cuerpos de agua se

¹ El Índice *Kappa* corresponde a una medida estadística que ajusta el efecto del azar en la proporción de la concordancia observada para elementos cualitativos (variables categóricas). Valores cercanos a 1,00 indican una mayor concordancia inter-observador. Los rangos de valores son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

² Valores cercanos a 1,00 indican una mayor concordancia inter-observador. Los rangos de valores son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

presenta en los meses de invierno, con registros más bajos en verano. Las variaciones entre las superficies de inviernos y veranos son variables, siendo en el sector de Aguas de Quelana donde se registran las mayores diferencias entre periodos, las que pueden alcanzar una reducción de un 98%. En general, se observa una tendencia al descenso de las superficies en la condición de invierno, donde por ejemplo en Sistema La Punta – La Brava, las diferencias entre superficies de inviernos y veranos ha disminuido y se ven acortadas hasta la fecha actual.

Las principales diferencias entre la serie histórica NDWI - Landsat y los resultados obtenidos en los informes semestrales, con imágenes de media resolución en el contexto del PSAH se atribuyen a diversos factores. Entre ellos, destaca el fortalecimiento de la metodología de procesamiento de imágenes, la incorporación de otros índices espectrales para abordar zonas con combinación de recubrimientos, como la intersección entre vegetación y agua. Además, la validación en terreno y el análisis visual desempeñan un papel importante al contribuir a la depuración precisa de los límites de los cuerpos de agua y a la calibración efectiva del modelo de clasificación, basándose en las observaciones de campo.

En particular, la validación en terreno implementada en el marco del PSAH ha permitido, por ejemplo, mejorar la delimitación en el subsector Laguna Interna, un proceso que no fue considerado en la metodología NDWI-Landsat histórica, lo que podría implicar, en este caso específico, una subestimación del área total en comparación con la metodología del PSAH. En el caso de Aguas de Quelana, la metodología aplicada en el PSAH posibilita la inclusión de áreas de vegetación inundada en la superficie total de ocupación de las lagunas, identificadas mediante índices como el NDVI y la banda NIR. Esto explica la detección de áreas de transición que no son captadas en su totalidad por la metodología NDWI-Landsat, generando discrepancias en las superficies entre ambos métodos.

En relación con la variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución, se observan cambios importantes en las superficies lagunares para el sector La Punta – La Brava, especialmente durante los meses de verano, donde hasta diciembre de 2019, las superficies superaron los valores históricos, pero a partir de 2020, se han situado por debajo. La relación entre precipitaciones y superficies no es del todo directa, y la variabilidad intranual juega un papel importante. En Peine, se observa variabilidad estacional en las superficies lagunares, con diferencias entre áreas de invierno y verano. Las precipitaciones no siempre se correlacionan con variaciones en las superficies, y la evapotranspiración influye en la respuesta del sistema. Las superficies semestrales obtenidas en el PSAH en Aguas de Quelana superan el mínimo histórico en invierno pero quedan por debajo en verano. Aunque hay eventos de precipitaciones notables, la variabilidad estacional se atribuye principalmente a la evaporación, respaldando el modelo conceptual propuesto. En Soncor, las variaciones entre las imágenes de alta resolución a lo largo de los reportes semestrales se deben en gran medida a mejoras metodológicas, mientras que el descenso de las superficies históricas en verano desde 1984 sugiere una tendencia.

En general, la variabilidad estacional de las lagunas se ve influida por múltiples factores, y la relación entre precipitaciones y superficies no es directa en todos los sectores. La evapotranspiración emerge como un factor importante en la dinámica de estos sistemas lagunares.

2 INTRODUCCIÓN

El Salar de Atacama, se encuentra ubicado en una cuenca endorreica tectónica, delimitada por la Cordillera de Los Andes (6.000 m s.n.m) al este, y por la Cordillera de Domeyko (3.000 m s.n.m) al oeste (Ortiz, C. *et al*, 2014). Además, presenta la característica que la dinámica natural de humedales está controlada fundamentalmente por el aporte de agua subterránea y condiciones climáticas regionales, esto los hace particularmente frágiles (MMA, 2011).

Este informe se desarrolla en cumplimiento a los compromisos ambientales y procedimientos asumidos en marco del **Plan de Seguimiento Ambiental y Plan de Alerta Temprana de los Recursos Hídricos (PSAH)**, en adelante Plan de Seguimiento Hídrico o PSAH, correspondiente a la RCA N°21/2016 que aprueba el Proyecto “**Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama, Región de Antofagasta – Rockwood Lithium**”, en adelante Albemarle (ALB), para el componente físico hidrología, monitoreo de “Superficie cubierta por lagunas”.

El propósito es realizar el seguimiento para determinar la cobertura de los cuerpos de agua, a través de imágenes satelitales, en cuatro sistemas lagunares del Salar de Atacama que conforman el área de estudio: (1) La Punta y La Brava, (2) Peine, (3) Aguas de Quelana y (4) Soncor. Para tal fin, se utilizan imágenes satelitales multiespectrales con un píxel máximo de 4 metros, es decir de alta resolución, utilizando el sensor Pleiades 1-A (2 m) y de mediana resolución de acceso público del sensor Landsat 8 (30 m), obtenidas en **agosto y diciembre de 2023**.

Este informe corresponde al monitoreo y seguimiento ambiental de las “Superficies Cubierta por Lagunas”, mediciones de invierno y verano de 2023, durante la Fase de Operación, período establecido, en Anexo 3 - Adenda 5 RWL (2015), numeral 3.2.6 Superficie cubierta por lagunas, Tabla 3-1 Variables de monitoreo del PSAH.

El parámetro ambiental asociado a este monitoreo, corresponde a la superficie cubierta por lagunas, en metros cuadrados (m²), proveniente de la medición de las áreas de los cuerpos de aguas de los sistemas lagunares mencionados, realizado a través del análisis de imágenes satelitales de alta resolución, según el “Índice Normalizado de diferencias de agua (NDWI)³”, especificado en el Anexo 2, Adenda 5 EIA, *Apéndice B. Determinación espacio temporal de la vegetación azonal y cuerpos de agua*; RWL, 2015 (en adelante, Adenda 5 RWL, 2015). En la Tabla N°2-1 se presenta un resumen del componente y la variable ambiental objeto de monitoreo, asociada al análisis de imágenes satelitales.

³ El índice modificado MNDWI es adecuado para realzar el agua en contraste con terrenos construidos y puede revelar mayores detalles en aguas abiertas (Xu, 2006). En este contexto, el NDWI es más eficiente en contraste con suelos desnudos con costra salina y aguas más someras.

Tabla N°2-1. Resumen de Componentes y Variables

Componente Ambiental	Monitoreo	Variable o Parámetro	Metodología
FÍSICO Hidrología	Superficie cubierta por lagunas	Superficie o Área (m ²)	<p>3.2.6 Superficie Cubierta por Lagunas, pág. 22. Adenda 5 RWL (2015).</p> <p>Análisis de imágenes satelitales de alta resolución, multiespectrales con un píxel máx. de 4 metros, que incluirán los cuatro sistemas lagunares. Metodología Índice Normalizado de diferencias de agua (NDWI). Anexo 3 PSAH.</p> <p>Además, con el objetivo de generar una correlación de estas imágenes de alta resolución con la serie histórica disponible de imágenes satelitales LANDSAT, de menor resolución, se realizará en forma simultánea un análisis y correlación con una imagen de baja resolución disponible del satélite LANDSAT8 o similar, de la fecha más próxima a las de las imágenes de alta definición.</p>

Fuente: Elaboración propia en base a lo especificado en el Anexo 2, Adenda 5 RWL EIA, Apéndice B. Determinación espacio temporal de la vegetación azonal y cuerpos de agua; RWL, 2015.

Para el logro del objetivo propuesto se implementó un muestreo para revalidación estacional *in situ* (dependiendo de las restricciones de acceso) y fotointerpretativo, correspondiente a las réplicas de puntos de campañas anteriores. Posteriormente se desarrolló la etapa en gabinete relacionada con el procesamiento de las imágenes satelitales, seguido por la implementación de un modelo de clasificación supervisada de los cuerpos agua, en base al “Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (NDWI, por sus siglas en inglés). Los responsables de las actividades de muestreo y medición en terreno, así como los análisis en gabinete se identifican en Tabla N°2-2.

Tabla N°2-2. Identificación de instituciones y/o equipos de trabajo encargados de realizar el muestreo, medición, análisis y/o control.

Empresa / Equipo de Trabajo	Actividades realizadas	Encargado
Cedrem Consultores	<u>Medición</u> : Revalidación estacional de puntos en terreno y levantamiento de puntos de posicionamiento en tiempo real de alta precisión; Revalidación estacional de puntos en terreno por fotointerpretación.	<u>Especialista</u> : Jessica Labarca (Fotointerpretación) Tomás Lizama (Especialista en Terreno; UVA/Dron - GNSS) David Moraga (Apoyo en Terreno) Magdalena Abarca (Apoyo en Terreno) Nicolás Benavides (Apoyo en Terreno)
	<u>Trabajo en gabinete</u> : Aplicación del modelo de clasificación supervisada y análisis de resultados.	<u>Jefe de Proyecto</u> : Jorge Ramos <u>Especialistas en gabinete</u> : Jessica Labarca Tomás Lizama

Empresa / Equipo de Trabajo	Actividades realizadas	Encargado
Apogeos	Trabajo en gabinete: Correcciones y adquisición de imágenes satelitales de alta resolución.	Lorena Bustamante (Especialista)

Fuente: Cedrem Consultores

El presente informe describe los alcances metodológicos, resultados y discusión del estudio, partiendo con el modelo de clasificación supervisada de los cuerpos de agua, el cual fue implementado en base a imágenes de alta resolución, Pleiades 1-A, y de media resolución, Landsat 8, obtenidas durante agosto y diciembre de 2023. Posteriormente, se presentan de manera detallada los resultados obtenidos en cuanto a la cobertura de los cuerpos de agua, clasificada por sistema lagunar, utilizando imágenes de alta resolución. Estos resultados se comparan con los registros históricos de la Adenda 5 RWL (2015) y con la superficie determinada a partir de las imágenes de Landsat 8. El objetivo de esta comparación es realizar un análisis detallado entre los monitoreos realizados durante el invierno y verano de 2023, contrastándolos con los resultados obtenidos desde el inicio del monitoreo en el año 2016, así como con los datos históricos presentados en la Adenda 5 RWL (2015).

En relación con la campaña de invierno de 2023, esta se llevó a cabo entre el 6 y el 12 de agosto de dicho año. Durante esta campaña no fue posible llevar a cabo la validación *in situ* debido a las medidas de restricción de movilidad aplicadas por la Comunidad de Peine; estas medidas limitaron el traslado y acceso a los sectores de Peine y La Punta – La Brava. En cuanto a la campaña de verano de 2023, la validación *in situ* programada entre el 12 y el 15 de diciembre no pudo llevarse cabo en los sectores de Peine y Soncor (solamente fue muestreada una porción de la zona sur de Barros Negros). Las medidas de restricción de movilidad implementadas por la Comunidad impidieron el traslado y acceso al sector de Peine en el verano 2023; además, en el sector Soncor, las autoridades restringieron el acceso en el área de la Reserva Nacional Los Flamencos debido a la anidación de aves. En ambas campañas las posibilidades de revalidación de los puntos de muestreo, fue realizada mediante fotointerpretación en gabinete con imagen de alta resolución.

3 OBJETIVOS

El objetivo general es monitorear la cobertura (superficie) de las lagunas (cuerpos de agua), con el fin de hacer el seguimiento a la evolución de estas y detectar cambios en su superficie de ocupación.

Como se ha señalado previamente, la medición se lleva a cabo mediante el análisis de imágenes satelitales de alta resolución y de mediana resolución. Estas mediciones se comparan con los datos históricos de la Adenda 5 RWL (2015) en cuatro sistemas lagunares ubicados en el Salar de Atacama. Cabe destacar que este análisis se realiza en concordancia con los alcances y procedimientos comprometidos en el PSAH, sirviendo como base para la evaluación.

En función de esto, se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Definir la cobertura de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales de alta resolución, en base a datos de validación (*in situ* o fotointerpretativas⁴) y al “Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (NDWI por su sigla en inglés), en cuatro sistemas lagunares del Salar de Atacama (La Punta - La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor).
- Comparar las coberturas de los sistemas lagunares, obtenidas a partir de los registros históricos determinados en la Adenda 5 RWL(2015) , y establecidos por el PSAH , con las superficies obtenidas de imágenes satelitales de alta resolución durante el monitoreo de la fase de operación del proyecto.
- Determinar las coberturas de cuerpos de agua desde una imagen satelital de mediana resolución disponible, Landsat 8, para la fase de operación y comparar éstas con los registros de las coberturas obtenidas en los registros históricos en cada sistema lagunar.
- Comparar y correlacionar⁵ las coberturas de los sistemas lagunares definidas para la fase de construcción con las coberturas de los sistemas lagunares definidas para la fase de operación, obtenidas desde imágenes satelitales de alta resolución y Landsat 8⁶.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio se sitúa en el Salar de Atacama, en la comuna de San Pedro de Atacama, Provincia de El Loa, extremo oriente de la II Región de Antofagasta y se encuentra a una altura geográfica aproximada de 2.300 m s.n.m

El área de estudio corresponde a los Sistemas Lagunares establecidos en el Plan de Seguimiento Ambiental y Plan de Alerta Temprana de los Recursos Hídricos (PSAH). Esta red de superficies lagunares corresponden a las indicadas en Anexo 3 – Adenda 5 RWL (2015), la que conforma un área de estudio total de 12.348,41 ha y comprende cuatro sistemas lagunares del Salar de Atacama (Figura N°4-1):

- i) *La Punta - La Brava*; se ubica en el sector sur del salar y abarca una superficie de 726,0 ha (5,9%).
- ii) *Lagunas de Peine*, ubicado al sur del salar, comprende las lagunas Salada, Interna y Saladita. Este sistema cubre un total 1.769,1 ha (14,3%).
- iii) *Aguas de Quelana*, se localiza en el centro-este del salar y abarca una superficie de 5.220,9 ha (42,3%).

⁴ Según condiciones de acceso a los subsectores de estudio, que incluyen permisos y condiciones de seguridad.

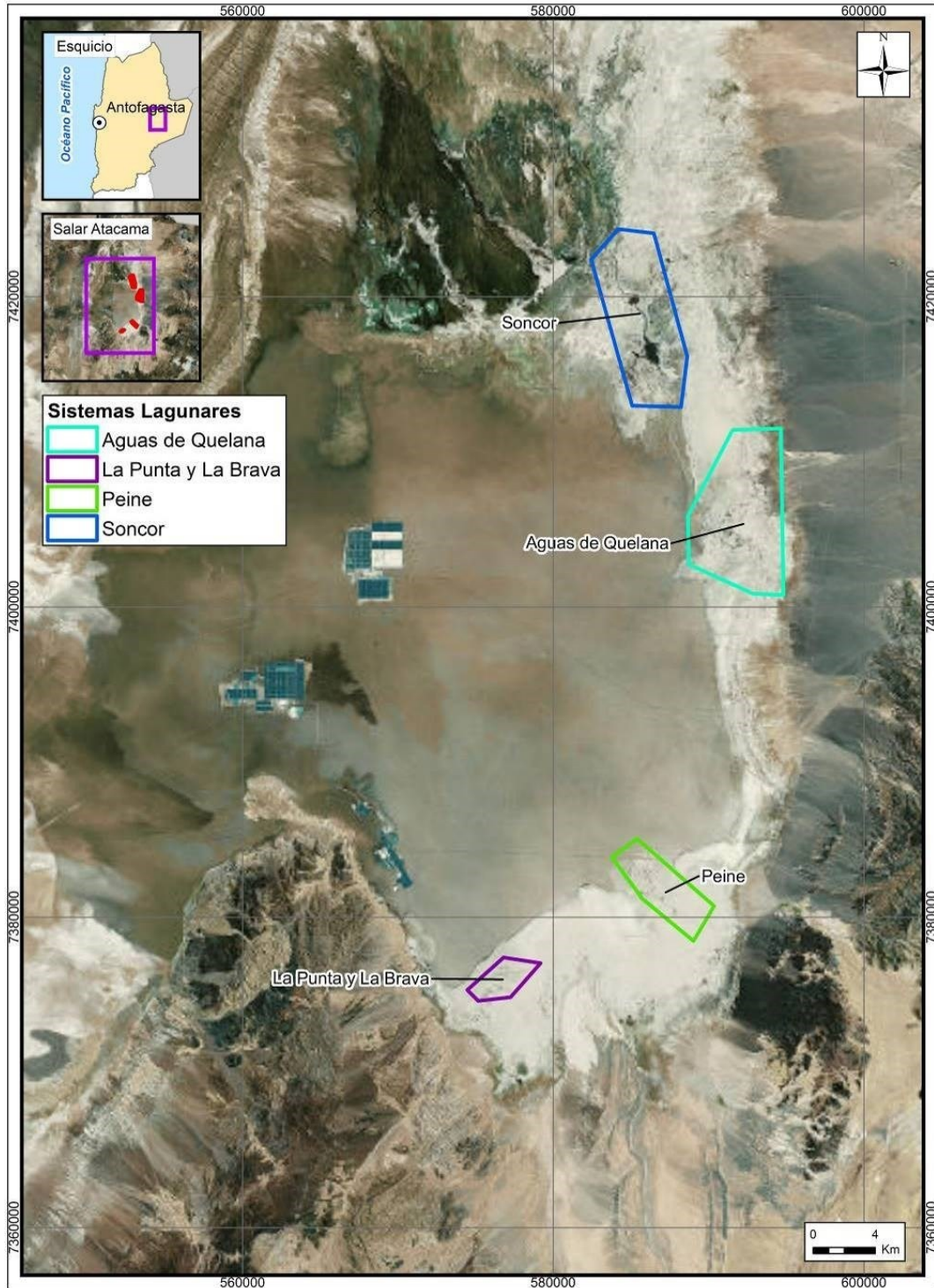
⁵ Medida de la fuerza y la dirección de la asociación entre las variables superficies Landsat y las superficies de alta resolución, llevada a cabo con el coeficiente de correlación de Pearson. El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a +1. Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables. Para la correlación de Pearson, un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

⁶ De acuerdo con lo establecido por el PSAH, este análisis se realiza con el fin de establecer correlaciones multitemporales 1:1 con los registros de alta resolución.

-
- iv) *Soncor*, se ubica en el sector norte del salar, a unos 30 km de las instalaciones de Albemarle – Planta Salar y cubre 4.632,5 ha (37,5%).

Los cuatros sistemas lagunares se ubican específicamente en la interfase salina al sur de la cuenca endorreica del Salar de Atacama. Esta zona de interfase supone una separación hidráulica subterránea, de tal manera que el flujo procedente de los acuíferos y, por tanto, desde las subcuencas aportantes, se ve forzado a ascender, alcanzando la superficie donde se forman estos sistemas lagunares permanentes. Una vez en superficie, las aguas que alimentan estos sistemas lagunares, comienzan a sufrir procesos de evaporación, presentando la máxima tasa de evaporación en la franja que rodea al núcleo salino por los márgenes N y E, coincidiendo con la presencia de una cuña salina (Cornellà, O. *et al*, 2009). A medida que estas aguas avanzan sub-superficialmente hacia el núcleo del Salar, se enriquecen progresivamente en sales disueltas. En el resto de la zona marginal, en torno al núcleo del salar, las aguas del acuífero se sitúan muy próximas a la superficie del terreno, sin llegar a aflorar, y sufren una evaporación muy intensa, con una oscilación estacional, la cual provoca que los niveles asciendan en los meses de invierno, y desciendan en verano, cuando se favorecen flujos de evaporación mayores (Adenda 5 RWL, 2015).

Figura N°4-1. Ubicación sistemas lagunares que conforman el área de estudio para monitoreo y seguimiento de la cobertura de cuerpos de agua por parte del Proyecto en el Salar de Atacama.



Fuente: Cedrem Consultores en base al Plan de Manejo Biótico (RWL, 2015); y el estudio "Determinación Espacio Temporal de la Vegetación Azonal y Cuerpos de Agua (Adenda 5 RWL, 2015)".

4.2 Parámetros utilizados para caracterizar el estado y seguimiento de los cuerpos de agua

El parámetro de seguimiento utilizado en el presente análisis corresponde a las superficies de agua estimadas por sistema lagunar a través de imágenes satelitales. Esto en cumplimiento a lo dispuesto en la Adenda 5 RWL (2015), Anexo 3 (PSA) y la RCA que aprueba al proyecto, donde se establece que: *“La superficie cubierta por las lagunas (área inundada) es una variable asociada al comportamiento de los objetos de protección y relacionada con los niveles piezométricos del área de alimentación de las lagunas. Se medirá en los sistemas de Peine, y La Punta-La Brava, y en los sistemas de Soncor y Quelana donde esta variable se considera además de referencia ubicada en sectores vecinos no influenciados”*

De forma complementaria, en los resultados por sector, y siendo consistente con lo analizado en el documento antes mencionado, en relación con *“...se realizará una correlación con una imagen de baja resolución disponible del satélite LANDSAT 8 o similar, de la fecha más próxima a las de las imágenes de alta definición, de menor resolución”*; en el presente estudio se realiza una comparación entre las superficies determinadas en base a las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y Landsat 8.

4.3 Ubicación de los puntos de muestreo para validación de cuerpos de agua

Esta etapa del estudio conllevó el trabajo en terreno, el cual se realizó con la finalidad de coleccionar los datos que revalidan el modelo de clasificación supervisada usado para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales; en los casos donde no sea posible el acceso para la colecta de datos, se reemplazará por el análisis fotointerpretativo. La técnica de interpretación visual o fotointerpretación se realiza en base a las imágenes satelitales e/o imágenes de dron, proceso en el que se les asigna a estos puntos el tipo de recubrimiento de suelo que presentan. El método fotointerpretativo para el seguimiento lagunar se realiza en base a la imagen de alta resolución (Pleiades 1-A, 8bits), con variación en la composición de colores para la mejor visualización del cambio de coberturas (método de empleo de falso color). La fotointerpretación o clasificación visual es parte de los procesos de reconocimiento, identificación y delimitación de los recubrimientos detectados en una zona de estudio que, en base a diferentes criterios visuales (color, tono, brillo, textura, formas y aspectos temporales), son parte de las técnicas de muestreo para la metodología de clasificación supervisada.

El muestreo ejecutado, consistió en la validación del tipo de recubrimiento de suelo existente, como *“cuerpo de agua”* u *“otro recubrimiento”*, para cada punto de monitoreo y por sistema lagunar en estudio.

El propósito del muestreo 2023 es revalidar el recubrimiento de suelo, mediante réplicas de los puntos levantados desde el primer año de monitoreo, desde agosto y diciembre de 2016 hasta agosto y diciembre de 2022, en zonas representativas de cuerpos de agua permanentes y zonas que presentan diferencias intra e interanuales, a lo que se suma el criterio de accesibilidad.

La captura de las imágenes satelitales de alta resolución para todos los sectores (Pleiades 1-A) y la descarga de la imagen de media resolución (Landsat 8), se realizó en paralelo a las campañas de terreno en las fechas propuestas para el seguimiento lagunar. Complementariamente, se utilizaron

imágenes de dron DJI modelo *Mavic Pro* con cámara de 12 mega pixeles en los sectores donde no se presentaron restricciones de movilidad, tanto en invierno como en verano 2023.

El diseño de muestreo implementado para el trabajo en terreno – *in situ*, corresponde al tipo *aleatorio – estratificado y estratificado- dirigido* mediante transectos, en los cuatro sistemas lagunares, criterio que se aplica en base a las condiciones de seguridad por el limitado acceso y al conocimiento adquirido en campañas anteriores sobre estos sistemas.

El tamaño de muestra se calculó a partir de la superficie mínima de cuerpos de agua registrada para el componente en la Adenda 5 RWL (2015) y los valores del índice NDWI de imágenes satelitales de alta resolución disponibles.

La Tabla N°4-1 y Tabla N°4-2 presentan el detalle del muestreo aplicado en cada sistema lagunar en estudio. Las diferencias en la ubicación y el número de puntos considerados para validación entre imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8, se debe a las diferencias de resolución espacial entre ellas (2 m y 30 m, respectivamente), lo que se grafica en el ANEXO 9-1, ANEXO 9-2, ANEXO 9-3 y ANEXO 9-4. En el desglose se puede apreciar aquellos puntos validados en terreno – *in situ* – y aquellos provenientes de la fotointerpretación de la imagen satelital.

Tabla N°4-1. Número de puntos de monitoreo catastrados en la campaña de invierno 2023, para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama.

SISTEMA LAGUNAR	RECUBRIMIENTO	PUNTOS DE VALIDACIÓN				PUNTOS DE VALIDACIÓN MODELO	
		PLEIADES 1A		LANDSAT 8		PLEIADES 1A	LANDSAT 8
		TERRENO	FOTOINT*	TERRENO	FOTOINT*		
La Punta y La Brava	Otros recubrimientos	-	205	-	63	249	80
	Cuerpos de agua	-	100	-	34	56	17
	Total sistema lagunar	-	305	-	97	305	97
Peine	Otros recubrimientos	-	69	-	65	118	64
	Cuerpos de agua	-	122	-	117	73	118
	Total sistema lagunar	-	191	-	182	191	182
Aguas de Quelana	Otros recubrimientos	39	-	50	-	65	70
	Cuerpos de agua	45	-	34	-	19	14
	Total sistema lagunar	84	-	84	-	84	84
Soncor	Otros recubrimientos	125	-	115	-	139	120
	Cuerpos de agua	131	-	118	-	117	113
	Total sistema lagunar	256	-	233	-	256	233
TOTAL GENERAL			836		596	836	596

Fuente: Cedrem Consultores. *Fotointerpretación en base a imagen satelital AR (en falso color) e/o imagen UVA – dron;
 **Terreno – *in situ*–: recorrido pedestre con marcación de puntos con dispositivo GPS.

Tabla N°4-2. Número de puntos de muestreo catastrados en la campaña de verano 2023, para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama.

SISTEMA LAGUNAR	RECUBRIMIENTO	PUNTOS DE VALIDACIÓN				PUNTOS DE VALIDACIÓN MODELO	
		PLEIADES 1A		LANDSAT 8		PLEIADES 1A	LANDSAT 8
		TERRENO	FOTOINT*	TERRENO	FOTOINT*		
La Punta y La Brava	Otros recubrimientos	223	-	77	-	273	88
	Cuerpos de agua	82	-	20	-	32	9
	Total sistema lagunar	305	-	97	-	305	97
Peine	Otros recubrimientos	-	71	-	68	109	92
	Cuerpos de agua	-	120	-	114	82	90
	Total sistema lagunar	-	191	-	182	191	182
Aguas de Quelana	Otros recubrimientos	76	-	76	-	80	80
	Cuerpos de agua	8	-	8	-	4	4
	Total sistema lagunar	84	-	84	-	84	84
Soncor	Otros recubrimientos	14	138	14	125	174	157
	Cuerpos de agua	7	97	7	87	82	76
	Total sistema lagunar	21	235	21	212	256	233
TOTAL GENERAL			836		596	836	596

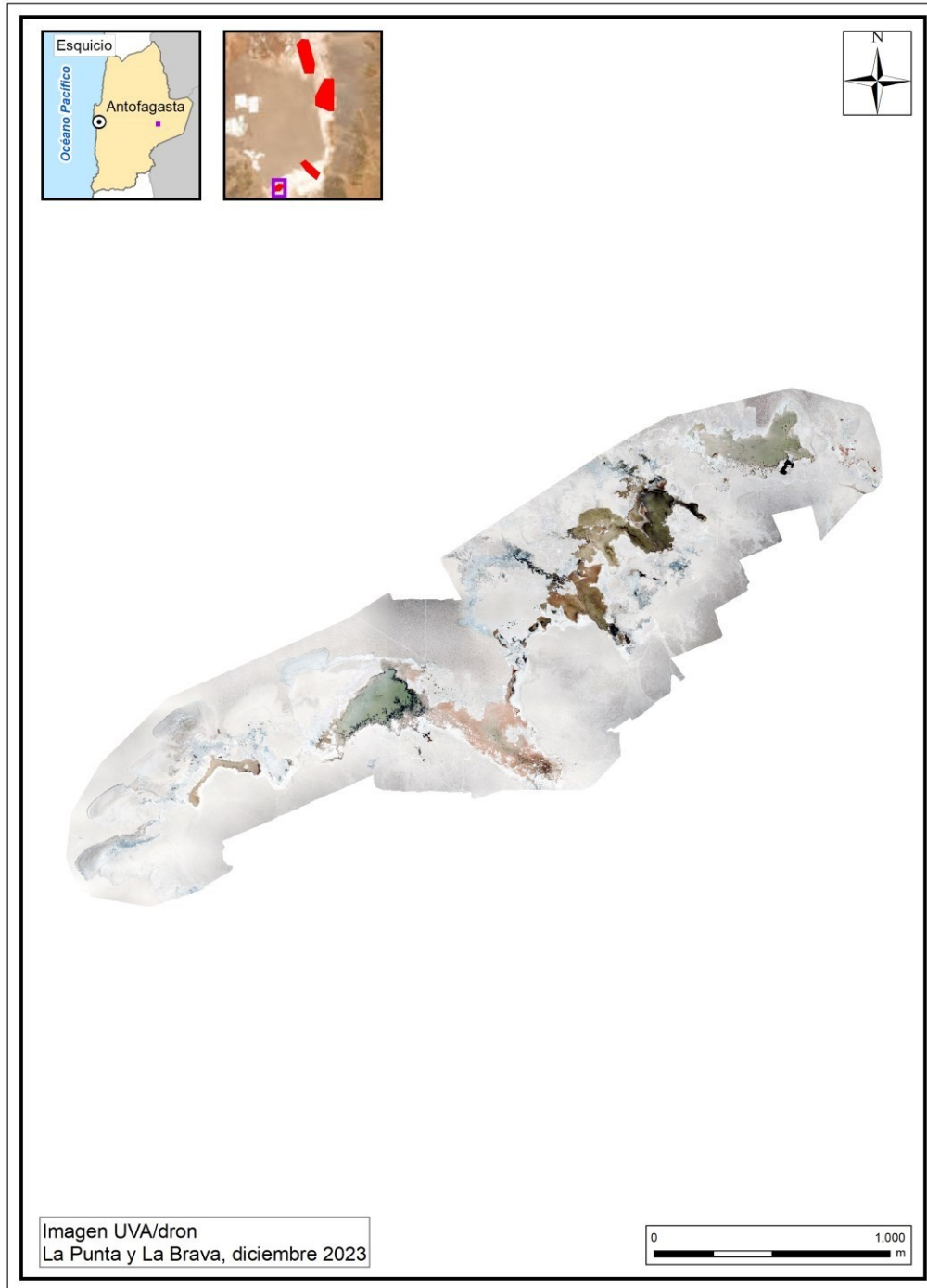
Fuente: Cedrem Consultores. *Fotointerpretación en base a imagen satelital AR (en falso color) e/o imagen UVA – dron ** Terreno – *in situ*–: recorrido pedestre con marcación de puntos con dispositivo GPS.

4.4 Materiales y equipos utilizados

El equipo utilizado en ambas campañas para el levantamiento de puntos de información en los sistemas lagunares, corresponden a un receptor Full GNSS/GPS, Navcom SF-3040 con sistema Starfire de geoposicionamiento, que entrega información en coordenadas UTM 19S WGS84. Además, se utilizó un dron DJI modelo Mavic Pro con cámara de 12 mega pixeles, con vuelo programado a 200 metros de altura.

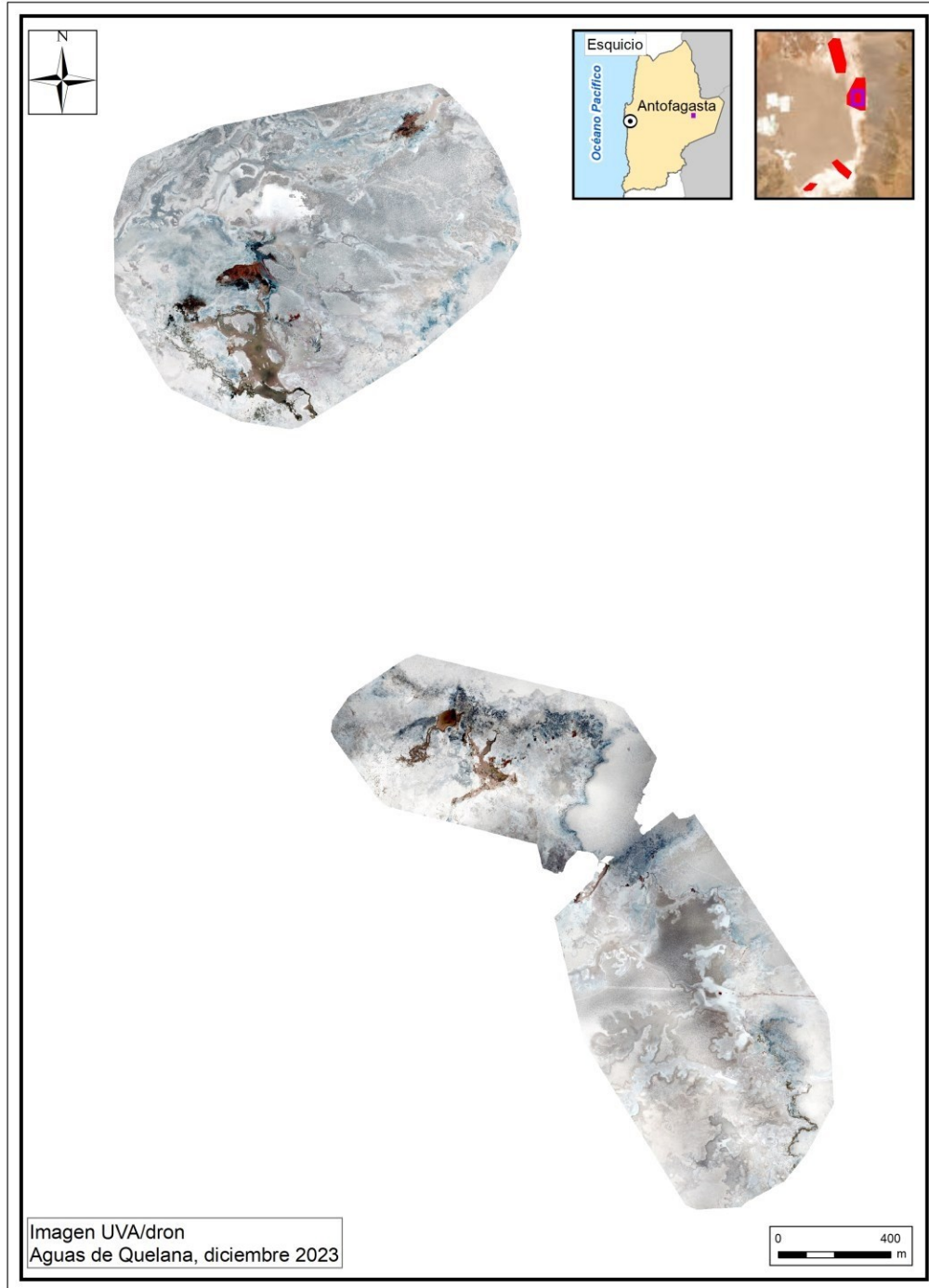
En la campaña invierno 2023 no fue posible realizar la validación en terreno y vuelo dron - UVA en los sectores de La Punta – La Brava y Peine, ya que se presentaron por parte de la Comunidad de Peine medidas de restricción de movilidad que no permitieron el traslado y acceso a los sectores señalados; En cuanto a la campaña de verano de 2023, la validación no pudo llevarse cabo en los sectores de Peine y Soncor (solamente fue muestreada una porción de la zona sur de Barros Negros). Las medidas de restricción de movilidad implementadas por la Comunidad impidieron el traslado y acceso al sector de Peine; además en el sector Soncor, las autoridades restringieron el acceso en el área de la Reserva Nacional Los Flamencos debido a la anidación de aves. En ambas campañas las posibilidades de revalidación de los puntos de muestreo, fue realizada mediante fotointerpretación en gabinete con imagen de alta resolución. La Figura N°4-2 a Figura N°4-4, muestran los resultados de los vuelos autorizados en la campaña de verano 2023.

Figura N°4-2. Imagen UVA/dron, sector La Punta – La Brava, verano 2023.



Fuente: Elaboración Propia en base a mosaico imagen UVA/dron sector La Punta – La Brava.

Figura N°4-3. Imagen UVA/dron, sector Aguas de Quelana, verano 2023.



Fuente: Elaboración Propia en base a mosaico imagen UVA/dron sector Aguas de Quelana.

Figura N°4-4. Imagen UVA/dron, sector Soncor (vuelo parcial sector sur Barros Negros), verano 2023.



Fuente: Elaboración Propia en base a mosaico imagen UVA/dron al sur de Barros Negros, sector Soncor.

4.5 Metodología de muestreo y/o medición

El muestreo en terreno se llevó a cabo mediante el levantamiento de puntos de monitoreo con receptores Full GNSS/GPS, que consistió en el marcaje del tipo de recubrimiento de suelo directamente en terreno para cada punto de medición, en coordenadas UTM 19S WGS84. Complementariamente, se utilizaron imágenes de dron en los sectores que no presentaban restricciones de movilidad.

Posteriormente, en el software GIS ArcMap 10.8 se validan los puntos a los que no se pudo acceder en terreno, mediante la técnica de interpretación visual o fotointerpretación en base a las imágenes satelitales e imágenes de dron, proceso en el que se les asignó a estos puntos el tipo de recubrimiento de suelo (cuerpo de agua / otro recubrimiento). El método fotointerpretativo se realiza en base a la imagen de alta resolución (Pleiades 1-A, 8bits), con variación en la composición de colores para la mejor visualización del cambio de coberturas (método de empleo de falso color). La fotointerpretación o clasificación visual es parte de los procesos de reconocimiento, identificación y delimitación de los recubrimientos detectados en una zona de estudio que, en base a diferentes criterios visuales (color, tono, brillo, textura, formas y aspectos temporales), son parte de las técnicas de muestreo para la metodología de clasificación supervisada.

En las campañas de invierno y verano 2023, este muestreo se implementó en los puntos de réplicas estacionales de las campañas de invierno y verano de 2016 a 2022, en zonas representativas de lagunas recurrentes y donde se determinaron las principales diferencias entre la medición de terreno y el modelo de clasificación supervisada, en períodos intra e interanuales, resguardando las condiciones de accesibilidad, seguridad y permisos respectivos en zonas de acceso restringido. El ANEXO 9-1, ANEXO 9-2, ANEXO 9-3, ANEXO 9-4 muestran la distribución de los puntos de validación en cada sistema lagunar de estudio y el detalle de sus coordenadas se encuentra en el ANEXO 9-5.

4.6 Metodología de análisis de las imágenes satelitales para delimitación de cuerpos de agua

4.6.1 Imágenes de alta resolución – Pleiades 1-A

Las imágenes multiespectrales de alta resolución usadas en el presente estudio provienen del sensor Pleiades 1-A, y en su conjunto conforman dos mosaicos, el primero en el sector sur que corresponde a los sistemas de Peine y La Punta - La Brava; y el segundo en el sector norte, que comprende los sistemas lagunares de Soncor y Aguas de Quelana (Figura N°4-5). En la campaña de invierno 2023, se obtuvieron las imágenes Pleiades 1-A, el **8 y 14 de agosto de 2023** (mosaico norte y sur, respectivamente), y en verano 2023 el **22 y 29 de diciembre de 2023** (mosaico norte y sur, respectivamente). La selección de este tipo de imágenes se debe a que sus características permiten contar con la resolución espacial adecuada para la cartografía detallada y de precisión (Pancromática, 50 cm; Multiespectral, 2 m), y permite mayor flexibilidad en cuanto a la periodicidad de captura, ya que su intervalo de revisita es de 24 h.

El satélite Pleiades está constituido de una banda pancromática con resolución de 0,5 m en visual nadir y 4 bandas espectrales (blue - azul, green - verde, red - rojo y near infrared - infrarrojo cercano). La precisión de corrección por ortorectificación puede encontrarse dentro 1m y 10m respectivamente. Las

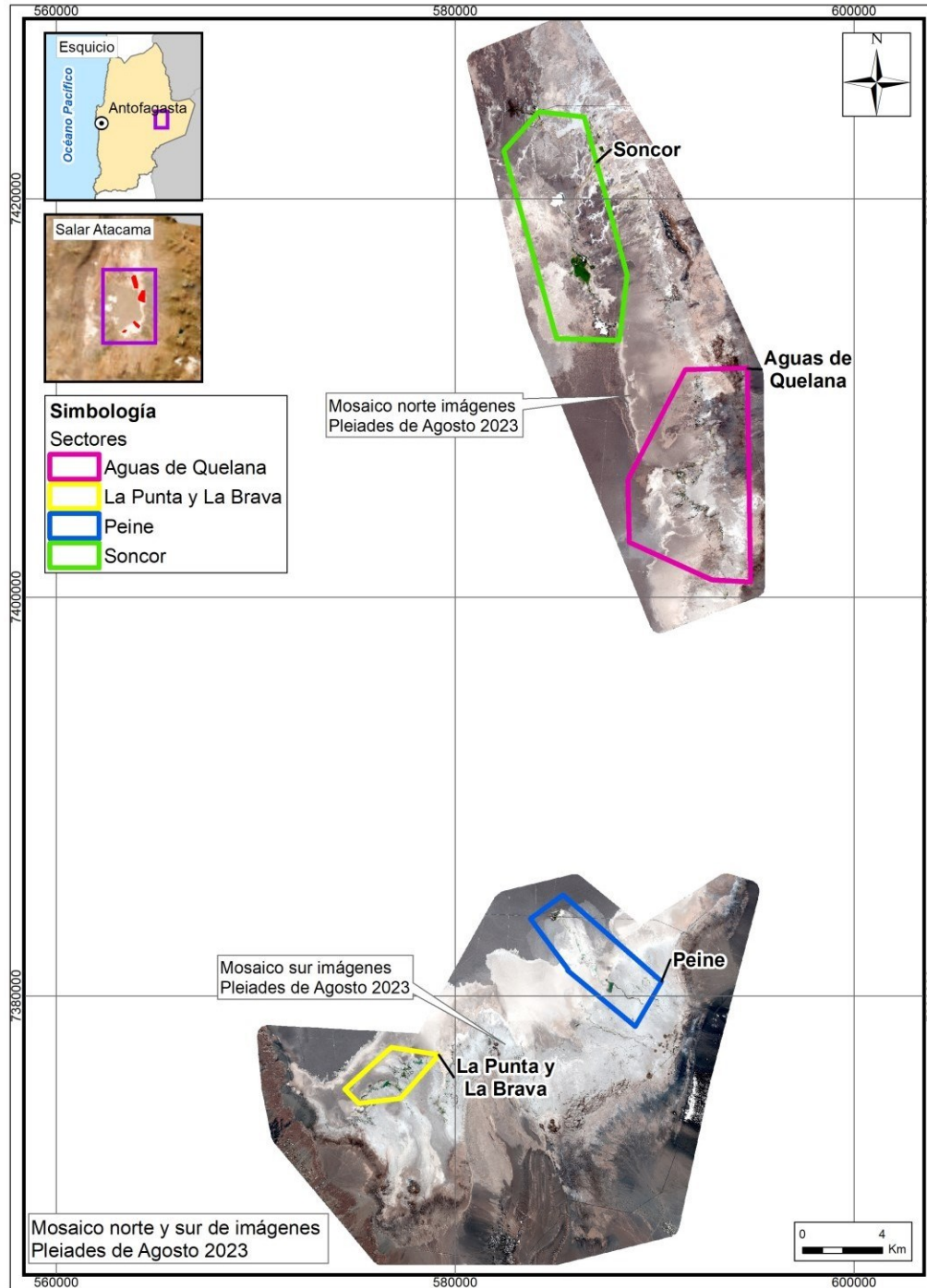
principales características del sensor se describen en la Tabla N°4-3, el ANEXO 9-7 se presenta el *metadata* de las imágenes analizadas.

Tabla N°4-3. Características técnicas del sensor Pleiades 1-A.

CARACTERÍSTICAS	DETALLE	
Órbita	Altitud: 695 km	
	Tipo: Tipo sincrónica con el sol	
Bandas Sensor	Pancromáticas: 480 - 830 nm	
	Multiespectrales	
	Azul: 430 - 550 nm	Rojo: 600 - 720 nm
	Verde: 490 - 610 nm	Infrarrojo: 750 - 950 nm
Resolución del sensor	Pancromática: 50 cm	
	Multiespectral: 2 m	

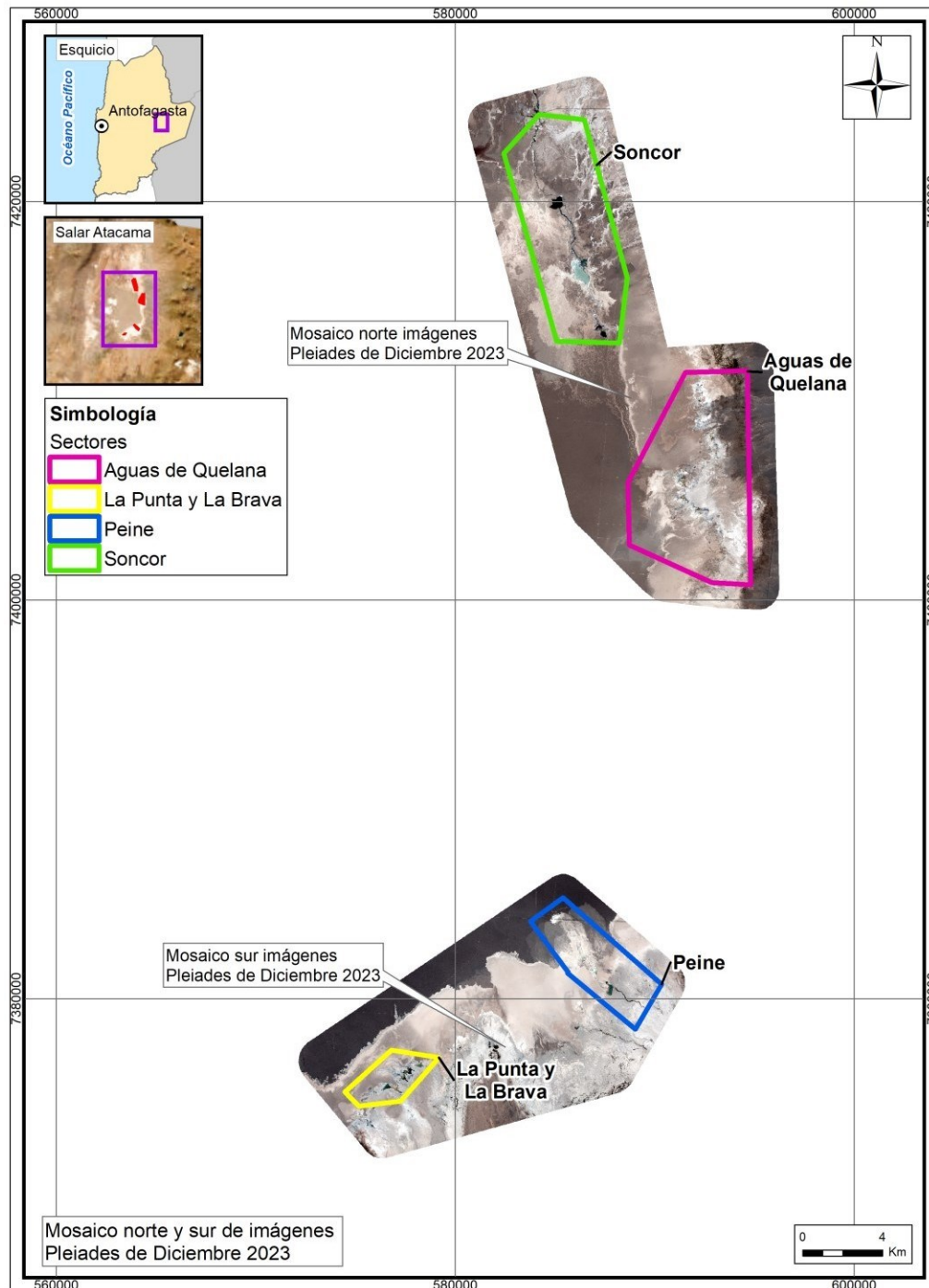
Fuente: Airbus Defense and Space. <http://www.cscrs.itu.edu.tr/assets/downloads/PleiadesUserGuide.pdf>. Revisitada en agosto y diciembre 2023.

Figura N°4-5. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades 1-A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama, invierno 2023.



Fuente: Cedrem Consultores en base a imágenes alta resolución Pleiades 1-A (invierno 2023).

Figura N°4-6. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades 1-A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama verano 2023.

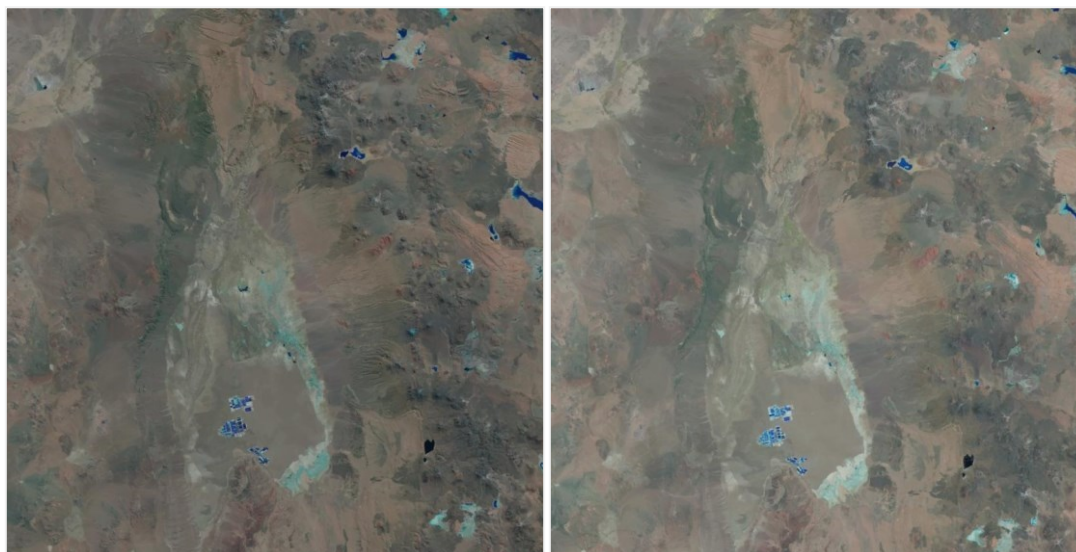


Fuente: Cedrem Consultores en base a imágenes alta resolución Pleiades 1-A (verano 2023).

4.6.2 Imagen de resolución media – LANDSAT 8

Las imágenes usadas cubren por completo el área de estudio y las fechas de captura corresponden al **14 de agosto y 20 de diciembre de 2023**. La descarga se realiza en forma gratuita desde <http://earthexplorer.usgs.gov/>, sitio web de *United States Geological Survey* (USGS; Figura N°4-7). El sensor Landsat 8 dispone de 11 bandas espectrales, con una resolución (tamaño del píxel) de 30 x 30 m. De éstas, se utilizaron cinco bandas en el proceso de delimitación de los cuerpos de agua del área de estudio. Las características de las bandas espectrales del sensor Landsat 8 se describen en Tabla N°4-4 y el ANEXO 9-8 presenta la *metadata* de la imagen descargada.

Figura N°4-7. Imagen Landsat 8 correspondiente al cuadrante que incluye el área de estudio en invierno 2023 (izquierda – RGB) y verano 2023 (derecha - RGB).



Fuente: United States Geological Survey USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Revisitada en agosto y diciembre de 2023.

Tabla N°4-4. Características técnicas de las bandas espectrales de la imagen Landsat 8

Banda	Ancho (µm)	Resolución (m)
Band 1 Costera	0,43 – 0,45	30
Band 2 Azul	0,45 – 0,51	30
Band 3 Verde	0,53 – 0,59	30
Band 4 Rojo	0,64 – 0,67	30
Band 5 Infrarrojo Cercano (NIR)	0,85 – 0,88	30
Band 6 Infrarrojo de Onda Corta 1 (SWIR 1)	1,57 – 1,65	30
Band 7 Infrarrojo de Onda Corta 2 (SWIR 2)	2,11 – 2,29	30
Band 8 Pancromática (Pan)	0,50 – 0,68	15
Band 9 Cirros (Cirrus)	1,36 – 1,38	30
Band 10 Sensor Térmico Infrarrojo 1 (TIRS 1)	10,6 – 11,19	100
Band 11 Sensor Térmico Infrarrojo 2 (TIRS 2)	11,5 – 12,51	100

Fuente: United States Geological Survey USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Visitada en agosto y diciembre 2023.

4.6.3 Procesamiento de las imágenes satelitales

Tanto las imágenes Landsat 8, como las Pleiades 1-A de alta resolución, 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.

Inicialmente, a cada imagen se le realizó una corrección radiométrica, la cual consiste en la conversión de los valores de pixeles desde números digitales (ND) a unidades de radiancia espectral absoluta ($W / (m^2 * sr * \mu m)$)⁷. 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 una base para la comparación de datos en una sola escena o entre imágenes adquiridas en fechas diferentes o por diferentes sensores (Chander *et al.*, 2009).

Posteriormente, se realizó la corrección atmosférica de cada imagen. Esta corrección 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 y del terreno, recuperan los parámetros físicos de la superficie incluyendo la reflectancia, visibilidad del suelo y temperatura. Para este fin, se utilizó el modelo de corrección espectral de reflectancia a nivel de superficie de *Airbus*, realizado por el mismo proveedor en las imágenes de alta resolución (Pleiades). Este modelo permite ejecutar correcciones de reflectancia provenientes de la parte alta de la atmósfera, la eliminación de neblina y el enmascaramiento de nubes, así como correcciones de la atmósfera baja y a nivel de suelo, y las correcciones atmosféricas de la temperatura superficial. En el caso de las imágenes de resolución media, las imágenes Landsat 8 Level-2 Surface Reflectance (L2SP) son productos procesados y corregidos por el proveedor para corregir diversos efectos atmosféricos y de iluminación. Las correcciones atmosféricas incluyen la eliminación o reducción de efectos causados por la presencia de gases, aerosoles y nubes en la atmósfera.

Es importante mencionar que este estos métodos en comparación al método IARR (por su sigla en inglés) y que corresponde al *promedio interno de reflectancia relativa* aplicado en la Adenda 5 RWL (2015), constituye un mejoramiento en el modelo actual, producto del refinamiento en el proceso de remoción del error atmosférico proporcionado por el modelo de *Airbus* (Chuvieco, 2006) y el modelo L2SP. Esta diferencia metodológica, puede variar la respuesta espectral de los parámetros espectrales utilizados (ej. NDVI, NDWI; Lamolda, 2008), conduciendo a la mejor detección de cuerpos de agua con el modelo actual (el ANEXO 9-6 detalla los ajustes metodológicos aplicados y sus implicancias en la estimación de los cuerpos de agua).

Posteriormente, las imágenes fueron ortorrectificadas para eliminar las distorsiones geométricas, producto de imperfecciones del sensor, la curvatura de la tierra y los efectos locales del relieve.

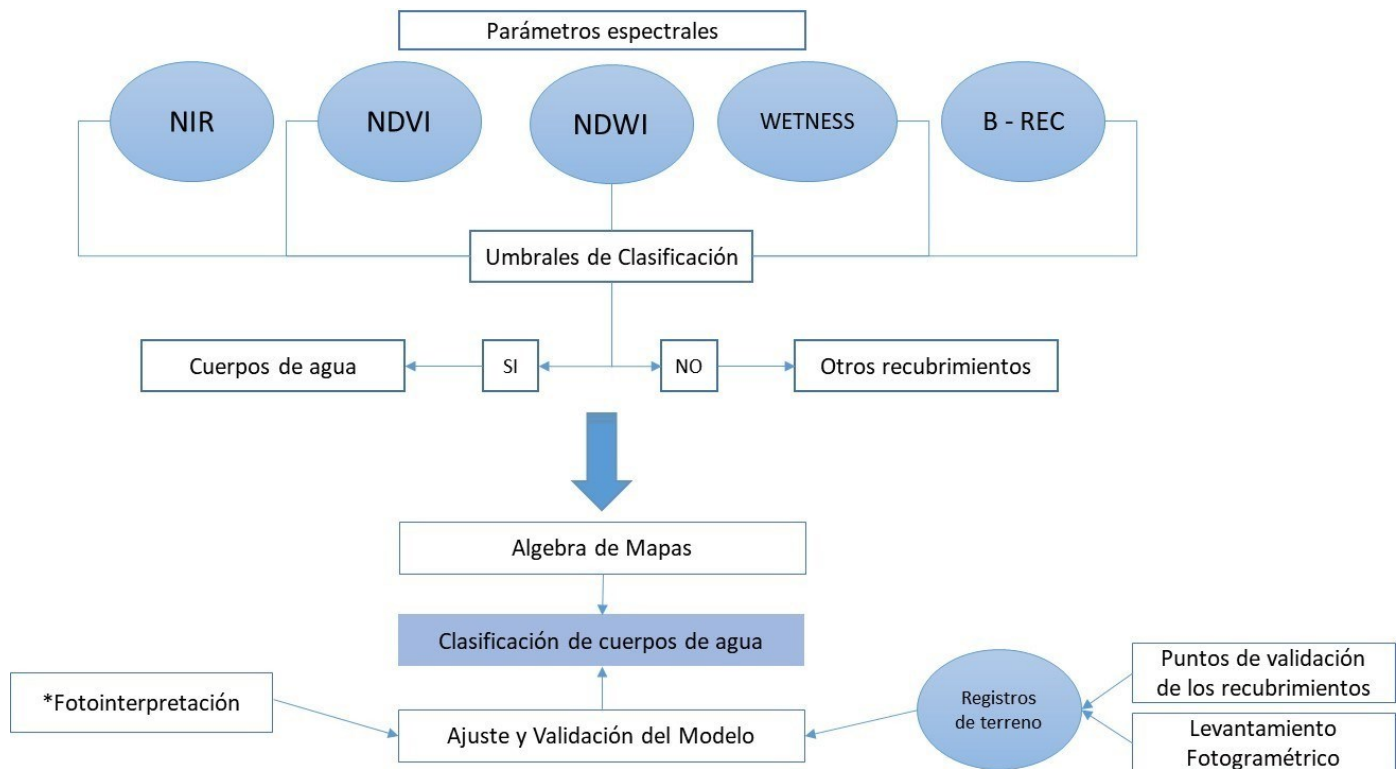
⁷ Dónde: W: Watts; m²: metro cuadrado; sr: estereorradián; μm : micrómetro.

Finalmente, en el caso de las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A, fueron unidas conformando dos mosaicos dentro del área de estudio (polígono norte y sur en la Figura N°4-5 y Figura N°4-6).

4.6.4 Descripción del modelo de clasificación supervisada de cuerpos de agua

El modelo usado durante este análisis se desarrolló en base a la metodología “Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (NDWI por su sigla en inglés), la cual fue empleada en el estudio desarrollado en la Adenda 5 RWL (2015); y que fue establecido como base para este componente.

Figura N°4-8. Modelo conceptual de árbol de decisiones usado para la clasificación supervisada de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales.



Índices Multiespectrales: NIR= Banda del infrarrojo cercano, NDVI= Índice de vegetación normalizado; NDWI= Índice diferencial de agua normalizado, WETNESS= Índice de Humedad derivado de transformación *Tasseled Cap* con bandas de imágenes Landsat 8; B - REC= reclasificación de bandas espectrales azul, verde, rojo e infrarrojo cercano. *El levantamiento fotogramétrico se realiza complementario a los puntos de validación; en caso de no contar con acceso a las áreas se utiliza el método de *Fotointerpretación. Fuente: Elaboración Propia en base a metodología “Modificada del Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (MNDWI) en Adenda 5 RWL (2015).

La clasificación supervisada de imágenes satelitales se empleó para la identificación y delimitación de los cuerpos de agua. El método se inicia con el establecimiento de los umbrales de clasificación para cada uno de los parámetros espectrales en evaluación y que tienen una respuesta determinada ante la presencia de un cuerpo de agua. Posteriormente, en un modelo de árbol de decisiones, se estiman los cuerpos de agua utilizando la combinación de los criterios definidos en cada parámetro, y se evalúa el

ajuste y la precisión del modelo mediante la comparación con los datos validados en terreno o por fotointerpretación (Figura N°4-8).

Los parámetros evaluados durante la clasificación supervisada en el presente estudio fueron cinco:

- i) Banda infrarroja (NIR),
- ii) Índice NDWI;
- iii) Índice NDVI;
- iv) Reclasificación de bandas espectrales (B1<B2) y (B3 > B4), usada en el modelo de imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y
- v) Transformación “*Tasseled Cap*” (*Wetness*; Kauth & Thomas, 1976), la cual se utilizó para el caso Landsat 8, dado el mayor número de bandas que ofrece este sensor.

El acápite 4.6.5 describe en detalle cada uno de estos parámetros.

Comparativamente entre la metodología de la Adenda 5 RWL (2015) y la actual, cabe destacar que en esta última se incorporan dos parámetros espectrales adicionales, correspondientes a NDVI y a la transformación “*Tasseled Cap*” (*Wetness*). Esta modificación, se realizó con el fin de robustecer el modelo ya desarrollado, considerando que los suelos salinos usualmente presentan distintos tipos y concentraciones de sales, afectando la reflectancia del suelo en distintos grados y puede conducir a errores significativos durante interpretaciones espectrales (Wang *et al.*, 2012). El ANEXO 9-6 detalla en un cuadro comparativo los ajustes metodológicos aplicados con relación a la Adenda 5 RWL (2015).

4.6.5 Parámetros espectrales del modelo de clasificación

a. Índice de Diferencia Normalizada de Agua – NDWI

En la Adenda 5 RWL (2015) (Anexo 3 PSAH, apartado 3.2.6 de “Superficie cubierta por lagunas”), se indica que: “*Para la determinación de la superficie cubierta por lagunas, en la imagen de alta resolución se utilizará metodología “Modificación del Índice Normalizado de diferencias de agua (MNDWI)”, que determina la presencia de agua mediante la respuesta espectral del infrarrojo medio, con la siguiente expresión:*

$$MNDWI = \frac{G - MIR}{G + MIR} \quad (1)$$

Donde *G* es la banda espectral correspondiente al color verde y el *MIR* es la banda del Infrarrojo medio”.

La fórmula corresponde a la desarrollada por Xu, 2006.

Sin embargo, en el mismo acápite, en algunos párrafos previo a la fórmula se indica textual: “*Se utilizarán imágenes de satelitales multiespectrales con un tamaño de píxel de máximo 4 metros que incluirán los sistemas lagunares de La Punta-La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor*” (énfasis es propio). Lo anterior, y según las condiciones técnicas, lleva a un ajuste en la metodología dado que la existencia de imágenes que cuenten con la banda MIR es limitada y en general cuentan con menor resolución espacial (ej. satélites Spot con una banda MIR con resolución espacial de 20m, muy superior a los 4 m máximos).

Además, es importante señalar, que la variable Superficies Lagunares, es también compromiso del seguimiento biótico (PMB) y por lo tanto, se debe compatibilizar ambos compromisos, es decir, también debe cumplir con la metodología especificada en el Anexo 2, Adenda 5 EIA, apéndice b), 2015 “Determinación espacio temporal de la vegetación azonal y cuerpos de agua. Estudio de Impacto Ambiental”, que indica que:

“Para la delimitación de las superficies cubiertas por aguas existe el cálculo del Índice de Diferencia Normalizada de Agua o NDWI (Normalized Difference Water Index). La fórmula utilizada para el cálculo de este índice es la siguiente (Gao, 1995; McFeeters, 1996):

$$NDWI = \frac{\rho_i V - \rho_i IRC}{\rho_i V + \rho_i IRC} \quad (2)$$

dónde: *V* es la reflectancia en el verde (visible) (Banda 2); *IRC* = reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (Banda 4)”.

Finalmente, la selección de la fórmula de McFeeters (2), responde a la necesidad de ajustar imágenes de alta resolución (ya sea imágenes de archivo o programadas) manteniendo todos los objetivos propuestos en la Adenda 5 RWL (2015) y la base de la fórmula propuesta, tanto para el PSAH como para el PMB, siendo esta última la utilizada en el presente informe con el fin de estandarizar los métodos.

El índice NDWI varía entre -1 y 1, asociando los valores positivos para las superficies con agua o húmedas y cero o negativo para el suelo y la vegetación terrestre estresada. El cálculo de este parámetro se realizó tanto en las imágenes Landsat 8 como en las imágenes de alta resolución Pleiades-1A.

b. Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación - NDVI

El Índice NDVI (por su sigla en inglés, *Normalized Difference Vegetation Index*), consiste en la comparación entre las bandas roja e infrarrojo cercana, mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

El NDVI varía entre -1 y 1 y resalta en valores positivos las áreas con presencia de vegetación basándose en la reflectancia diferencial de la clorofila entre la banda infrarroja cercana (**NIR**) y la banda roja (**R**) del espectro visible. Adicionalmente, en el rango de los valores negativos este índice detecta superficies que generalmente corresponden a nubes o cuerpos de agua.

El cálculo de este parámetro se realizó tanto en las imágenes Landsat 8 como en las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A.

c. NIR - Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

La Banda NIR (Banda 5 en Landsat 8 y Banda 4 en Pleiades 1-A), posee características espectrales útiles para la detección de cuerpos de agua. Dadas las propiedades del agua de absorción de la

radiación electromagnética; esta baja reflectividad en el infrarrojo resulta útil en la distinción de áreas de tierra o suelos desnudos y agua.

Para el cálculo de este parámetro, se realiza la reclasificación de este parámetro tanto en las imágenes Landsat 8 como en las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A.

d. Reclasificación de bandas espectrales a partir de la condición de bandas de la imagen de alta resolución

Este parámetro consistió en un procedimiento de clasificación binaria de los píxeles en las imágenes espectrales Pleiades 1-A, en que los píxeles de las bandas espectrales de las imágenes se enfrentaron a la condición lógica de la presencia de cuerpos de agua versus otros recubrimientos, en base al segmento de longitud de onda que refleja cada banda. Para este caso se procedió el cumplimiento de la condición: $(B1 < B2)$ y $(B3 > B4)$. Donde las bandas corresponden a: B1 azul, B2 verde, B3 rojo y B4 infrarrojo cercano.

e. Transformación “Tasseled Cap”

La transformación “Tasseled Cap” (TCT) fue desarrollada para optimizar la visualización de la vegetación en imágenes multispectrales (Hernández, 2005). Esta transformación produce tres nuevas bandas a partir de las originales de la imagen: Brillo (Brightness), Verdor (Greenness) y Humedad (Wetness).

El índice de humedad es un contraste entre la reflectancia en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y el visible/infrarrojo cercano (VNIR), proporcionando una medida del contenido de humedad del suelo. En estas bandas, el agua absorbe la radiación (con coeficientes de ponderación negativos) respecto al resto de las bandas menos afectadas por la humedad (coeficiente bajo y positivo) (Crist & Cicone, 1984; Crist, *et al.*, 1986).

Este parámetro se utilizó sólo en el caso de Landsat 8 y para su cálculo se utilizaron coeficientes que derivan estadísticamente a partir de estas imágenes y de observaciones empíricas que son específicos para cada sensor (Crist, *et al.* 1986).

4.6.6 Umbrales y validación del modelo de clasificación

Durante el proceso de clasificación supervisada, se establecieron umbrales de clasificación de cada parámetro del modelo, los cuales representaron el valor límite de clasificación como cuerpo de agua u otro recubrimiento. Estos umbrales fueron definidos para cada sector, según el parámetro, para cada tipo de imagen satelital y para cada temporada (mes – año). La búsqueda de umbrales realiza en cada monitoreo, en consideración a las diferencias en la percepción del sensor de los recubrimientos del suelo, en otros, por el ángulo de iluminación del sol y la temporada del año en que se dé la captura; esta variación se traduce en el valor de los datos a analizar y por ende de valor de corte o umbral.

La definición de cada umbral se realizó mediante inspección visual fotointerpretativa, controlada por el conocimiento de las características de los objetos a catalogar; su respuesta espectral; y los umbrales determinados en campañas anteriores. Cabe destacar que las variaciones de estos valores respecto a los registros históricos de la Adenda 5 RWL (2015) son atribuibles al cambio del tipo de imágenes satelitales usadas; a las variaciones atmosféricas; las diferencias en el procesamiento de estas; y a cambios en los valores del conjunto de datos de cada imagen, correspondientes a la metodología detallada en el ANEXO 9-6.

Tabla N°4-5. Valores de los umbrales de clasificación de los parámetros espectrales usados, según Pleiades 1-A y Landsat 8, para la delimitación de cuerpos de agua en los sistemas lagunares del Salar de Atacama, agosto y diciembre de 2023.

TIPO DE IMAGEN	ÍNDICE	SISTEMA LAGUNAR			
		LA PUNTA Y LA BRAVA	PEINE	AGUAS DE QUELANA	SONCOR
Invierno 2023					
Parámetros AR PLEIADES	NDWI	P85 >= -0,068936899	P95 >= 0,05007625	NB 20/32 >= 0,00568345	NB 13/30 >= 0,033130064
	NDVI	P10 <= 0,015944409	P5 <= 0,005027738	NB 14/32 <= -0,007680778	NB 16/30 <= -0,088659387
	NIR - B4	P10 <= 0,22856006	P5 <= 0,202227605	NB 6/32 <= 0,146504024	P5 <= 0,161228714
	(B1<B2) Y (B3> B4)	SI	SI	NO	SI
Parámetros LANDSAT 8	NDWI	P90 >= -0,031812803	P95 >= -0,054415357	NB 22/32 >= -0,06733678	P95 >= -0,050237719
	NDVI	P5 <= -0,089175869	P5 <= 0,005931742	NB 12/32 <= 0,01291336	P5 <= -0,011952886
	NIR - B5	P5 <= 0,298705167	P5 <= 0,360613042	NB 5/32 <= 0,303720175	P5 <= 0,290834269
	WETNESS	NO	NB 15/32 >= 0,156158896	NO	NO
Verano 2023					
Parámetros AR PLEIADES	NDWI	P95 >= -0,025857668	NB 16/32 >= 0,044198746	NB 21/32 >= -0,027535064	NB 14/32 >= -0,032783157
	NDVI	NB 20/32 <= -0,021022553	NB 18/32 <= -0,060895595	NB 10/32 <= -0,006022841	NB 19/32 <= -0,016021073
	NIR - B4	P5 <= 0,401315977	NB 12/32 <= 0,348826398	NB 4/32 <= 0,229680181	NB 7/32 <= 0,226371218
	(B1<B2) Y (B3> B4)	SI	SI	NO	SI
Parámetros LANDSAT 8	NDWI	NB 7/32 >= -0,057969352	NB 10/20 >= -0,000404327	NB 28/32 >= -0,076568693	P95 >= -0,076441114
	NDVI	NB 25/32 <= 0,01853887	NB 26/32 <= -0,038038284	NB 7/32 <= 0,01996721	P5 <= 0,02212352
	NIR - B5	P5 <= 0,376015308	P10 <= 0,368423529	NB 2/32 <= 0,230052944	P5 <= 0,284576463
	WETNESS	NO	NB 21/32 >= 0,26360134	NO	NO

Dónde: Métodos de clasificación de datos: R: Intervalo equivalente (*Equal Interval*), NB: Quiebres naturales (*Natural breaks*), P: Percentiles (*Quantile*). Umbrales definidos cada temporada de monitoreo, de acuerdo con las variaciones temporales del sensor y la naturaleza de los sustratos; NO: el índice presenta homogeneidad en los datos y su clasificación no aporta al modelo, por lo que no se utiliza. Fuente: Elaboración Propia.

Debido a la complejidad de las áreas de estudio, fue preciso considerar diferentes intervalos en las distribuciones de las variables. Para ello, se utilizaron los métodos de clasificación de datos por percentiles, intervalos equivalentes y quiebres naturales; esto con el objeto de encontrar el mejor ajuste en el modelo de clasificación. Este proceso se realizó en el software ArcGIS 10.8. Los métodos de clasificación de datos permiten visualmente agrupar valores similares, y bajo ese análisis determinar cuál es la agrupación de datos (desde que valor o umbral) se expresa con mejor ajuste los tipos de recubrimientos (agua, otros recubrimientos).

Una vez fijado cada umbral de clasificación, se extrae el conjunto de píxeles espectralmente similares que formaron grupos o clases, a las que luego se les asigno el tipo de recubrimiento de suelo que representaban (cuerpos de agua u otros recubrimientos).

El cálculo final del modelo por sector se realiza mediante la unión de los parámetros reclasificados según el umbral definido y se determinó la cobertura de agua cuando al menos dos de los cuatro parámetros coincidían en clasificar el píxel como “cuerpo de agua”, de lo contrario quedó asignado como “otro recubrimiento”; esto para ambos tipos de imágenes. El criterio de decisión en la cantidad de parámetros usados para asignar la categoría se relaciona con la complejidad del patrón espacial de cada sistema lagunar y de su variabilidad estacional (Ortiz, C. *et al*, 2014; DGA, 2014; Cornellà, O. *et al*, 2009).

Posteriormente, se procede con la validación del modelo de clasificación la cual se realiza a través de una matriz de confusión, que permite evaluar la exactitud del modelo. Fundamentalmente consiste en estimar el número de puntos correctamente cartografiados dentro de un conjunto de datos. En este caso, la matriz se construyó con la información del tipo de recubrimiento establecido en los puntos de validación de terreno/fotointerpretación y fueron comparados con los resultados del modelo. En esta matriz, la diagonal principal indica que las muestras fueron coincidentes o correctamente interpretadas (ITC, 1999 en Flores, 2002).

El interés del uso de esta tabla de confusión proviene de su capacidad para plasmar conflictos entre categorías. De esta forma no sólo se conoce la fiabilidad global de la clasificación, sino también la exactitud conseguida para cada una de las clases, así como los principales conflictos entre ellas (Chuvieco, 2006).

A partir de la matriz de confusión se realiza el cálculo del índice *Kappa*⁸, el cual es una medida ajuste en términos de la exactitud del modelo de clasificación. Este mide la diferencia entre los datos de validación de terreno/fotointerpretación y la clasificación según el modelo, e intenta delimitar el grado de ajuste de los datos, prescindiendo de los factores aleatorios (Congalton, 1991). El coeficiente *Kappa* fue calculado de la siguiente manera:

$$\kappa = \frac{[(\Sigma \text{ concordancias observadas}) - (\Sigma \text{ concordancias atribuibles al azar})]}{[(\text{total de observaciones}) - (\Sigma \text{ concordancias atribuibles al azar})]}$$

El índice *Kappa* tiene un rango entre 0 y 1 el cual representa proporcionalmente la exactitud en el ajuste del modelo. Valores de *K* cercanos a 1 revelan una muy buena concordancia entre la realidad observada y la cobertura obtenida. Contrariamente, valores próximos a 0 sugieren que la concordancia observada es sólo debido al azar. Según Landis y Koch (1977), valores $K > 0,4$ indican un modelo de clasificación *acceptable* en término de exactitud, mayores a 0,6 sugieren un modelo *considerable* en la clasificación del recubrimiento de suelo obtenida.

Con los datos de la revalidación en terreno/fotointerpretación y la clasificación finalizada por sistema lagunar, se procede a evaluar su ajuste mediante la utilización de la matriz de confusión y el Índice de *Kappa*, con la finalidad de determinar el nivel de ajuste obtenido.

Complementario a lo anterior, a partir de la matriz de confusión también se obtuvo el índice de precisión global (*overall accuracy* u OA) que define la cantidad de puntos correctamente clasificados midiendo así la calidad de una clasificación expresada en porcentaje (0 a 100%), en que, si todos los puntos de

⁸ Los rangos de valores para *Kappa* son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

la imagen son clasificados al grupo que le corresponde según la información se terreno/fotointerpretación, vale decir, un 100% de coincidencias, se puede hablar de una clasificación perfecta (Li, Y., 2014).

4.6.7 Depuración cartográfica de cuerpos de agua

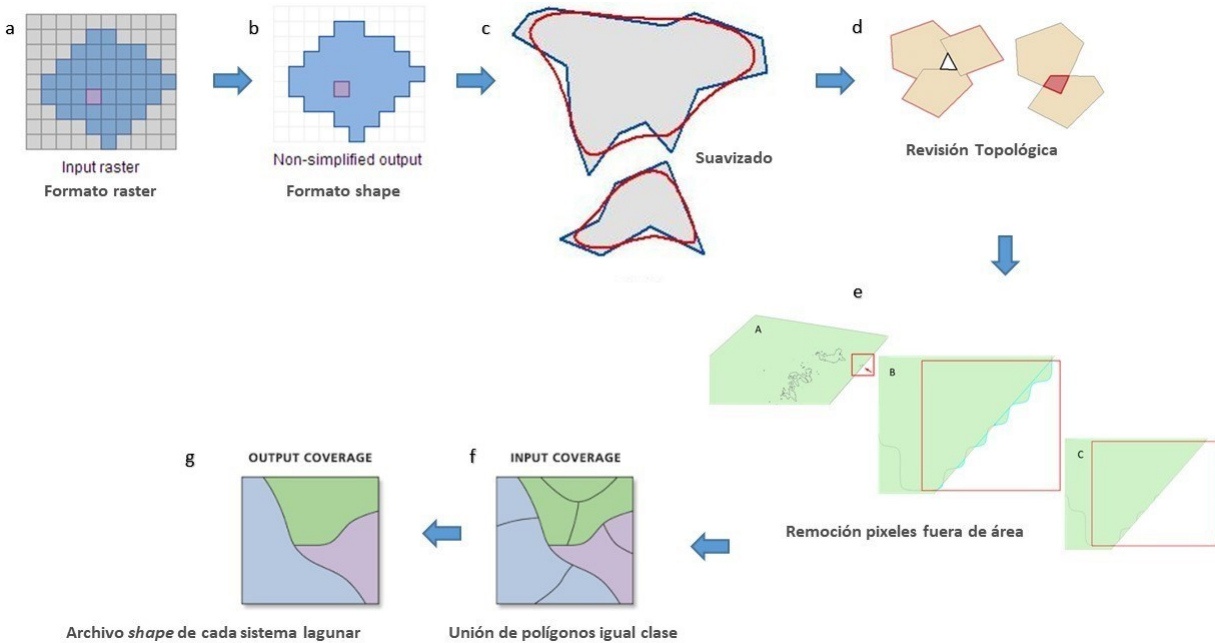
Posterior a obtener las coberturas de clasificación de los cuerpos de agua según el tipo de imagen satelital usada (Pleiades 1-A y Landsat 8) y por sistema lagunar, se procedió con la depuración de las coberturas. Este proceso consistió primero en la transformación de los datos desde formato *raster* a entidades de polígonos en formato *shape* (Figura N°4-9, a y b). El resultado se sometió a un proceso de suavizado, por la presencia de ángulos cerrados en sus contornos, para mejorar la calidad estética de la cartografía y su aproximación al contexto real (Figura N°4-9, c).

Adicionalmente, se realizó una depuración final en los *shapes*, la cual busca reducir errores de clasificación aleatorios siguiendo dos criterios:

- i) Revisión topológica de las coberturas, ante la presencia de espacios entre los bordes de los polígonos o bordes de polígonos superpuestos (Figura N°4-9, d) y,
- ii) Remoción de polígonos clasificados como cuerpos de agua con tamaño inferior al equivalente de un píxel (0,0004 ha en Pleiades - 1A y 0,09 ha en Landsat 8) y que surgen de la intersección con el área de estudio (Figura N°4-9, e).

Producto de estas operaciones se origina una clasificación binaria (cuerpos de agua / otros recubrimientos), que son fusionados con parámetros con igual codificación y ajustados a los polígonos que delimitan las áreas de estudio. El resultado final corresponde a un archivo en formato *shape* de cada sistema lagunar (La Punta - La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor) (Figura N°4-9, f y g).

Figura N°4-9. Diagrama del proceso de transformación y depuración de imágenes formato de cobertura continua (raster) a polígonos (shape).



Dónde: **a:** Ingreso Raster; **b:** transformación a formato shape; **c:** suavizado de polígonos; **d:** corrección de errores topológicos; **e:** generación de entidades poligonales; **f:** fusión de polígonos.

Fuente: Cedrem Consultores en base a imágenes ESRI.

4.7 Análisis comparativo para seguimiento de la cobertura de cuerpos de agua

De acuerdo con lo expresado en la sección 4.2. *Parámetros utilizados para caracterizar el estado y seguimiento de los cuerpos de agua*, esta etapa dio cumplimiento a lo dispuesto por el PSAH, numeral 3.2.6 Superficie cubierta por lagunas (Anexo 3, Adenda 5 RWL, 2015 y a la RCA N°21/2016).

En base a estos documentos, el análisis comparativo de las superficies se realizó por sistema lagunar, de acuerdo con las siguientes tipologías:

- *Comparación con registros históricos de la Adenda 5 RWL (2015):* se realizó entre el resultado de las superficies de lagunas registradas en los monitoreos de agosto y diciembre 2023, y las variaciones en relación con el mínimo histórico de la Adenda 5 RWL (2015).
- *Comparación entre imágenes satelitales:* se realizó una comparación entre las superficies determinadas en el monitoreo 2023 desde las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y Landsat 8.
- *Comparación entre monitoreos anuales:* se realizó una comparación entre los resultados de las superficies lagunares en el monitoreo 2023, con respecto a los resultados de los monitoreos entre 2016 y 2022.

Cabe destacar que el actual monitoreo, describe los cuerpos de agua en condiciones de operación del proyecto.

4.8 Fechas de medición

Respecto a la campaña de invierno 2023, ésta se realizó los días **06 al 12 de agosto de 2023**. En forma paralela a la campaña de terreno se obtuvieron las imágenes Pleiades 1A, el **8 y 14 de agosto de 2023** (mosaico norte y sur, respectivamente), y la captura de la imagen de media resolución (Landsat 8) corresponde al **14 de agosto de 2023**.

La campaña de verano 2023, se realizó los días **12 al 15 de diciembre de 2023**. En forma paralela a la campaña de terreno se obtuvieron las imágenes Pleiades 1A, el **22 y 29 de diciembre de 2023** (mosaico norte y sur, respectivamente), y la captura de la imagen de media resolución (Landsat 8) corresponde al **20 de diciembre de 2023**.

En la campaña invierno 2023 no fue posible realizar la validación en terreno y vuelo dron - UVA en los sectores de La Punta – La Brava y Peine, ya que se presentaron por parte de la Comunidad de Peine medidas de restricción de movilidad que no permitieron el traslado y acceso a los sectores señalados. En la campaña verano 2023 en el sector Soncor, se desarrolló un protocolo de control de acceso hacia áreas con presencia de flamencos en fase reproductiva por parte de CONAF; por lo tanto, no se realizó vuelo UVA/dron y el trabajo de validación de puntos de muestreo fue por el método fotointerpretativo. Para el sector Peine, se presenta restricción de acceso por parte de la Comunidad de Peine.

5 RESULTADOS

5.1 Validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua

La validación del ajuste de las coberturas determinadas, con relación a los datos de terreno recabados y fotointerpretados, se realizó mediante el índice *Kappa*. Este índice tuvo una variación entre 0,89 y 0,40 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A (Tabla N°5-1) y desde 0,94 y 0,41 para imágenes de resolución media Landsat 8 (Tabla N°5-2) en agosto de 2023. Respecto de diciembre de 2023, este índice tuvo una variación entre 0,82 y 0,46 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A (Tabla N°5-3) y desde 0,83 a 0,47 para imágenes de resolución media Landsat 8 (Tabla N°5-4). Todos los valores antes indicados muestran una alta precisión del modelo de clasificación supervisada aplicado, que según el índice *Kappa* muestra un nivel de concordancia *moderado a casi perfecta*⁹.

En relación con la precisión global, los valores tuvieron una variación entre 95% y 69% para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A (Tabla N°5-1) y entre 97% y 76% para imágenes de resolución media Landsat 8 (Tabla N°5-2) en agosto de 2023. Respecto de diciembre de 2023, la precisión global del modelo tuvo una variación entre 95% y 80% para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A (Tabla

⁹ Valores cercanos a 1,00 indican una mayor concordancia inter-observador. Los rangos de valores son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

N°5-3) y desde 93% a 86% para imágenes de resolución media Landsat 8 (Tabla N°5-4). La precisión global expresa que proporción de puntos de validación coincidió correctamente con el modelo generado, expresado como un porcentaje, siendo la precisión del 100% una clasificación perfecta. Valores promedio sobre el 80% muestran una alta concordancia de lo observado, con el resultado del método de clasificación supervisada.

El sistema lagunar que muestra mayor ajuste en agosto de 2023 desde imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8, es el sector Soncor con 0,89 y 0,94, respectivamente. En el caso de los sistemas Soncor y Peine, la definición de los bordes lagunares y el confinamiento de los cuerpos de agua en áreas definidas permite al modelo delimitar mejor las áreas de ocupación resultando en *kappa casi perfecto*. El menor ajuste para agosto 2023 se observa en el sector Aguas de Quelana y La Punta – La Brava, con 0,40 en Pleiades 1-A y 0,41 en Landsat 8, respectivamente; esto se debe principalmente a la fisonomía de los cuerpos de agua con poca definición de bordes, y discontinuidad de las áreas inundadas.

En relación con el mayor ajuste registrado en diciembre de 2023, se destaca el sistema lagunar de Soncor con un valor del índice *kappa* de 0,82 para Pleiades 1-A y 0,83 para Landsat 8. Por otro lado, el menor ajuste se observa en el sector La Punta - La Brava y Aguas de Quelana, registrando valores del índice *kappa* de 0,46 y 0,47 para Pleiades 1-A y Landsat 8, respectivamente.

De lo anterior, se señala que los mayores ajustes corresponden a los sectores que muestran una mayor definición de los cuerpos de agua, por sus características de topografía y tipo de sustrato, ya que se encuentran total o parcialmente delimitados por una diferencia de nivel de costra salina; por lo tanto, las respuestas espectrales son más claras, facilitando la determinación de umbrales de los parámetros del modelo y la clasificación final es mayormente coincidente con los determinados en terreno o por fotointerpretación visual (generalmente asociado a los sectores Peine y Soncor). Asimismo, los valores más bajos en el ajuste del modelo se reportan principalmente en sectores que muestran un gradiente de vegetación en los bordes lagunares, conformando un ecotono de vegetación, el cual conduce a una estimación menos precisa de los límites de la superficie de agua (proveniente principalmente de los parámetros NDVI y NIR). También ocurre con el retroceso de zonas inundadas con la exposición del sustrato que muchas veces está asociado a otros componentes, como microorganismos; o ante la discontinuidad de las inundaciones, generando parches que no son captados como unidades independientes, aumentando el error en sitios de transición seca – húmeda. De acuerdo con lo anterior, en los sectores La Punta – La Brava y Aguas de Quelana en el seguimiento 2023, se obtiene una baja de los cuerpos lagunares, y por ello la generación de cuerpos de agua discontinuos (de pequeña magnitud) y la exposición de recubrimientos mixtos (sal – microorganismos), que generan una discordancia entre lo “captado” por el sensor y lo corroborado por especialistas en terreno, repercutiendo en un menor índice *kappa* en dichos sectores.

Tabla N°5-1. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1-A: Matriz de confusión y el índice Kappa por sistema lagunar. Agosto, 2023.

Sistema lagunar	Recubrimiento del modelo de clasificación	* Número de Puntos de validación de terreno/fotointerpretación			**Exactitud del muestreo (%)	****Error de comisión (%)	
		Cuerpos de agua	Otros Recubrimientos	Total			
La Punta y La Brava	Cuerpos de agua	52	48	100	52,0	48,0	
	Otros Recubrimientos	4	201	205	98,0	2,0	
	Total	56	249	305	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	92,9	80,7	-	-	-	
	***Error omisión (%)	7,1	19,3	-	-	Índice Kappa:	0,56
						Precisión global (OA):	83 %
Peine	Cuerpos de agua	73	49	122	59,8	40,2	
	Otros Recubrimientos	0	69	69	100,0	0,0	
	Total	73	118	191	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	58,5	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	41,5	-	-	Índice Kappa:	0,52
						Precisión global (OA):	74 %
Aguas de Quelana	Cuerpos de agua	19	26	45	42,2	57,8	
	Otros Recubrimientos	0	39	39	100,0	0,0	
	Total	19	65	84	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	60,0	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	40,0	-	-	Índice Kappa:	0,40
						Precisión global (OA):	69 %
Soncor	Cuerpos de agua	117	14	131	89,3	10,7	
	Otros Recubrimientos	0	125	125	100,0	0,0	
	Total	117	139	256	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	89,9	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	10,1	-	-	Índice Kappa:	0,89
						Precisión global (OA):	95 %

Dónde: * número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo **Exactitud del muestreo: relación entre el número de puntos asignados correctamente y el total de los puntos por cobertura; ***El error de omisión lo conforman los residuales de las columnas ubicados en la parte inferior de la matriz, estos indican la cobertura que no se incluyó en el modelo; ****El error de comisión explica los puntos del mapa que no coincidieron con la realidad (Chuvienco, 2006). Exactitud de campo, en referencia al conocimiento previo recopilado de terreno *in situ* o la observación indirecta del territorio por medio de fuentes digitales (imagen satelital – imagen fuente UVA/dron) (Chuvienco, 2006).
Elaboración propia.

Tabla N°5-2. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Landsat 8: Matriz de confusión y el índice Kappa por sistema lagunar. Agosto, 2023.

Sistema lagunar	Recubrimiento del modelo de clasificación	* Número de Puntos de validación de terreno/fotointerpretación			**Exactitud del muestreo (%)	****Error de comisión (%)	
		Cuerpos de agua	Otros Recubrimientos	Total			
La Punta y La Brava	Cuerpos de agua	14	20	34	41,2	58,8	
	Otros Recubrimientos	3	60	63	95,2	4,8	
	Total	17	80	97	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	82,4	75,0	-	-	-	
	***Error omisión (%)	17,6	25,0	-	-	Índice Kappa:	0,41
						Precisión global (OA):	76 %
Peine	Cuerpos de agua	107	10	117	91,5	8,5	
	Otros Recubrimientos	11	54	65	83,1	16,9	
	Total	118	64	182	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	90,7	84,4	-	-	-	
	***Error omisión (%)	9,3	15,6	-	-	Índice Kappa:	0,75
						Precisión global (OA):	88 %
Aguas de Quelana	Cuerpos de agua	14	20	34	41,2	58,8	
	Otros Recubrimientos	0	50	50	100,0	0,0	
	Total	14	70	84	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	71,4	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	28,6	-	-	Índice Kappa:	0,45
						Precisión global (OA):	76 %
Soncor	Cuerpos de agua	112	6	118	94,9	5,1	
	Otros Recubrimientos	1	114	115	99,1	0,9	
	Total	113	120	233	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	99,1	95,0	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,9	5,0	-	-	Índice Kappa:	0,94
						Precisión global (OA):	97 %

Dónde: * número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo **Exactitud del muestreo: relación entre el número de puntos asignados correctamente y el total de los puntos por cobertura; ***El error de omisión lo conforman los residuales de las columnas ubicados en la parte inferior de la matriz, estos indican la cobertura que no se incluyó en el modelo; ****El error de comisión explica los puntos del mapa que no coincidieron con la realidad (Chuvieco, 2006). Exactitud de campo, en referencia al conocimiento previo recopilado de terreno *in situ* o la observación indirecta del territorio por medio de fuentes digitales (imagen satelital – imagen fuente UVA/dron) (Chuvieco, 2006).
Elaboración propia.

Tabla N°5-3. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1-A: Matriz de confusión y el índice Kappa por sistema lagunar. Diciembre de 2023.

Sistema lagunar	Recubrimiento del modelo de clasificación	* Número de Puntos de validación de terreno/fotointerpretación			**Exactitud del muestreo (%)	****Error de comisión (%)	
		Cuerpos de agua	Otros Recubrimientos	Total			
La Punta y La Brava	Cuerpos de agua	31	51	82	37,8	62,2	
	Otros Recubrimientos	1	222	223	99,6	0,4	
	Total	32	273	305	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	96,9	81,3	-	-	-	
	***Error omisión (%)	3,1	18,7	-	-	Índice Kappa:	0,46
						Precisión global (OA):	83%
Peine	Cuerpos de agua	82	38	120	68,3	31,7	
	Otros Recubrimientos	0	71	71	100,0	0,0	
	Total	82	109	191	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	65,1	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	34,9	-	-	Índice Kappa:	0,62
						Precisión global (OA):	80%
Aguas de Quelana	Cuerpos de agua	4	4	8	50,0	50,0	
	Otros Recubrimientos	0	76	76	100,0	0,0	
	Total	4	80	84	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	95,0	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	5,0	-	-	Índice Kappa:	0,64
						Precisión global (OA):	95%
Soncor	Cuerpos de agua	82	22	104	78,8	21,2	
	Otros Recubrimientos	0	152	152	100,0	0,0	
	Total	82	174	256	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	87,4	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	12,6	-	-	Índice Kappa:	0,82
						Precisión global (OA):	91%

Dónde: * número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo **Exactitud del muestreo: relación entre el número de puntos asignados correctamente y el total de los puntos por cobertura; ***El error de omisión lo conforman los residuales de las columnas ubicados en la parte inferior de la matriz, estos indican la cobertura que no se incluyó en el modelo; ****El error de comisión explica los puntos del mapa que no coincidieron con la realidad (Chuvienco, 2006). Exactitud de campo, en referencia al conocimiento previo recopilado de terreno *in situ* o la observación indirecta del territorio por medio de fuentes digitales (imagen satelital – imagen fuente UVA/dron) (Chuvienco, 2006).
Elaboración propia.

Tabla N°5-4. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Landsat 8: Matriz de confusión y el índice Kappa por sistema lagunar. Diciembre de 2023.

Sistema lagunar	Recubrimiento del modelo de clasificación	* Número de Puntos de validación de terreno/fotointerpretación			**Exactitud del muestreo (%)	****Error de comisión (%)	
		Cuerpos de agua	Otros Recubrimientos	Total			
La Punta y La Brava	Cuerpos de agua	9	11	20	45,0	55,0	
	Otros Recubrimientos	0	77	77	100,0	0,0	
	Total	9	88	97	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	87,5	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	12,5	-	-	Índice Kappa:	0,57
						Precisión global (OA):	89%
Peine	Cuerpos de agua	89	25	114	78,1	21,9	
	Otros Recubrimientos	1	67	68	98,5	1,5	
	Total	90	92	182	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	98,9	72,8	-	-	-	
	***Error omisión (%)	1,1	27,2	-	-	Índice Kappa:	0,72
						Precisión global (OA):	86%
Aguas de Quelana	Cuerpos de agua	3	5	8	37,5	62,5	
	Otros Recubrimientos	1	75	76	98,7	1,3	
	Total	4	80	84	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	75,0	93,8	-	-	-	
	***Error omisión (%)	25,0	6,3	-	-	Índice Kappa:	0,47
						Precisión global (OA):	93%
Soncor	Cuerpos de agua	76	18	94	80,9	19,1	
	Otros Recubrimientos	0	139	139	100,0	0,0	
	Total	76	157	233	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	88,5	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	11,5	-	-	Índice Kappa:	0,83
						Precisión global (OA):	92%

Dónde: * número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo **Exactitud del muestreo: relación entre el número de puntos asignados correctamente y el total de los puntos por cobertura; ***El error de omisión lo conforman los residuales de las columnas ubicados en la parte inferior de la matriz, estos indican la cobertura que no se incluyó en el modelo; ****El error de comisión explica los puntos del mapa que no coincidieron con la realidad (Chuvieco, 2006). Exactitud de campo, en referencia al conocimiento previo recopilado de terreno *in situ* o la observación indirecta del territorio por medio de fuentes digitales (imagen satelital – imagen fuente UVA/dron) (Chuvieco, 2006).
Elaboración propia.

5.2 Resultados Superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar

En términos generales, la Tabla N°5-5 y Tabla N°5-6 presentan las superficies de los cuerpos de agua que fueron determinadas a partir del modelo de clasificación supervisada. Al contrastar los resultados anuales de los cuatro sistemas en 2023, se observa que la mayor cobertura tanto en invierno como en verano, son para el sector Soncor con 177,3 ha y 112,9 ha desde Pleiades 1-A; y de 219,7 y 119,1 desde Landsat 8, respectivamente. En tanto, las menores superficies observadas desde el análisis con Landsat 8 y Pleiades 1-A, se presentaron en el sector Aguas de Quelana, en invierno 2023 y verano 2023.

A continuación, en la Tabla N°5-5, se describe el detalle por sistema lagunar, de las coberturas determinadas desde la imagen de alta resolución (Pleiades 1-A) y la comparación tanto con los registros históricos de la Adenda 5 RWL (2015), como con las superficies desde Landsat 8 (Tabla N°5-6).

Tabla N°5-5. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y datos obtenidos en el monitoreo 2023 (invierno y verano), respecto de los registros históricos (Adenda 5 RWL, 2015).

Sistema Lagunar	Superficie Mínima Histórica Adenda 5 (ha) Quickbird/Worldview/Geoeye**		Superficies lagunares (ha) Monitoreo Fase Operación			
	ha	m ²	Invierno 2023		Verano 2023	
			ha	m ²	ha	m ²
La Punta y La Brava	31,6 feb-14	316.000	45,5	455.090,3	26,6	266.615,0
Peine	48,9 mar-06	489.000	29,4	293.950,5	22,0	220.413,0
Aguas de Quelana	11,3 mar-07	113.000	18,9	189.179,8	5,9	59.003,0
Soncor	192,4 mar-07	1.924.000	177,3	1.772.903,3	112,9	1.128.774,0

Dónde: *Superficies a partir de modelo de clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2023. (**): Las fechas en que se obtuvieron los registros históricos, corresponden a las que se presentaron en el "Apéndice B. Determinación Espacio Temporal de la Vegetación Azonal y Cuerpos de agua" del "Anexo 2 Plan de Manejo Biótico" y que se enmarcan en las áreas definidas por los polígonos indicados en la RCA N°21/2016 (Considerando N°7), "Polígonos en Tabla de 3-4 del Anexo 3" del PSAH del proyecto. Fuente: Elaboración Propia

Tabla N°5-6. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales Landsat 8 y datos obtenidos en el monitoreo 2023 (invierno y verano), respecto de los registros de la Adenda 5 RWL (2015).

Sistema Lagunar	Superficie Mínima Histórica (ha) Adenda 5 Landsat Histórico		Superficies lagunares (ha) Monitoreo Fase Operación			
	ha	m ²	Invierno 2023		Verano 2023	
			ha	m ²	ha	m ²
La Punta y La Brava	19,2 mar-73	192.000	39,4	393.827,2	28,8	287.706,7
Peine	25,4	254.000	62,2	621.914,9	26,9	268.952,2

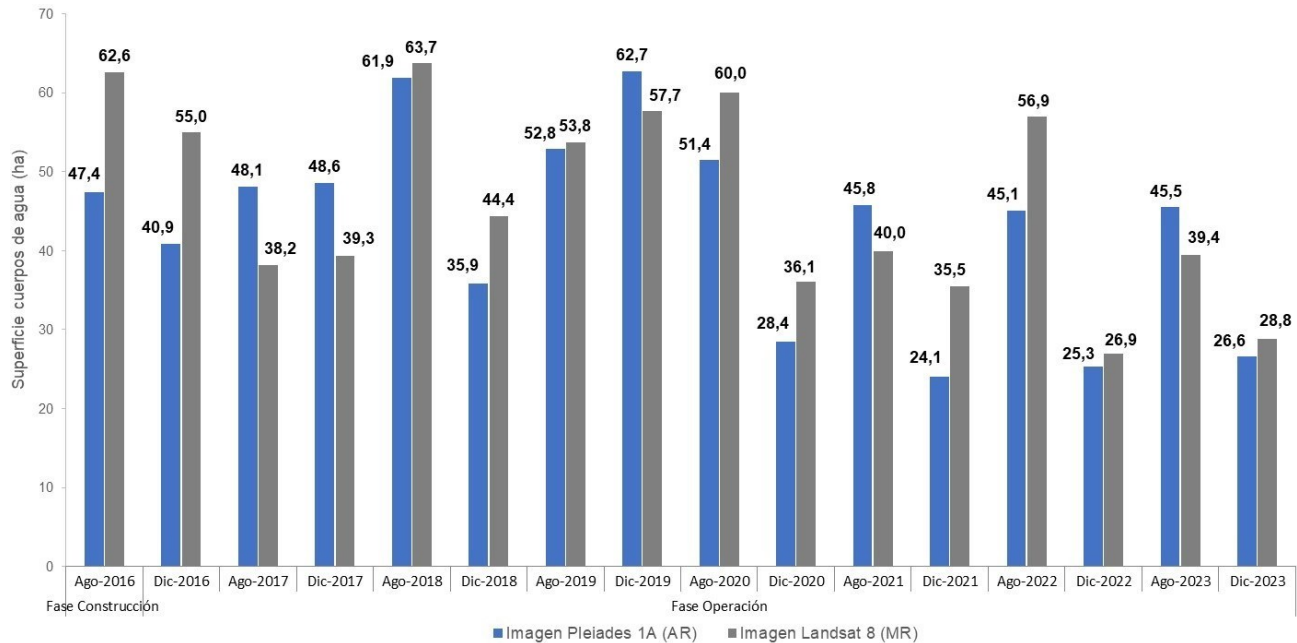
Sistema Lagunar	Superficie Mínima Histórica (ha) Adenda 5 Landsat Histórico		Superficies lagunares (ha) Monitoreo Fase Operación			
			Invierno 2023		Verano 2023	
	ha	m ²	ha	m ²	ha	m ²
	nov-75					
Aguas de Quelana	0,2 (nov 1975, feb - mar 1976)	2.000	28,8	288.145,1	13,0	129.567,5
Soncor	143,3 feb-76	1.433.000	219,7	2.196.775,7	119,1	1.191.265,3

Dónde: *Superficies a partir de modelo de clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2023. (**): Superficies de mediana resolución (LANDSAT), que se presentaron para el PSAH en el "Apéndice L. Monitoreo de dinámica espaciotemporal de lagunas de la Zona Marginal del Salar de Atacama a través de imágenes satelitales LANDSAT" y que se enmarcan en las áreas definidas por los polígonos indicados en la RCA N°21/2016 (Considerando N°7), "Polígonos en Tabla 3-4 del Anexo 3" del PSAH del proyecto. Fuente: Elaboración Propia

5.2.1 La Punta - La Brava

En el sistema lagunar La Punta - La Brava, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades 1-A en agosto de 2023 es de 45,5 ha y en diciembre 2023 abarca una superficie de 26,6 ha (Tabla N°5-5). La Figura N°5-1 a Figura N°5-2 muestran los resultados gráficos y numéricos de las superficies monitoreadas entre 2016 a 2023, desde que se aprobó la RCA 021/2016.

Figura N°5-1. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar La Punta - La Brava.



Dónde: **MR**: Imagen de Mediana Resolución (píxel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (píxel menor a 4m). Fuente: Cedrem Consultores a partir de modelo de clasificación supervisada.

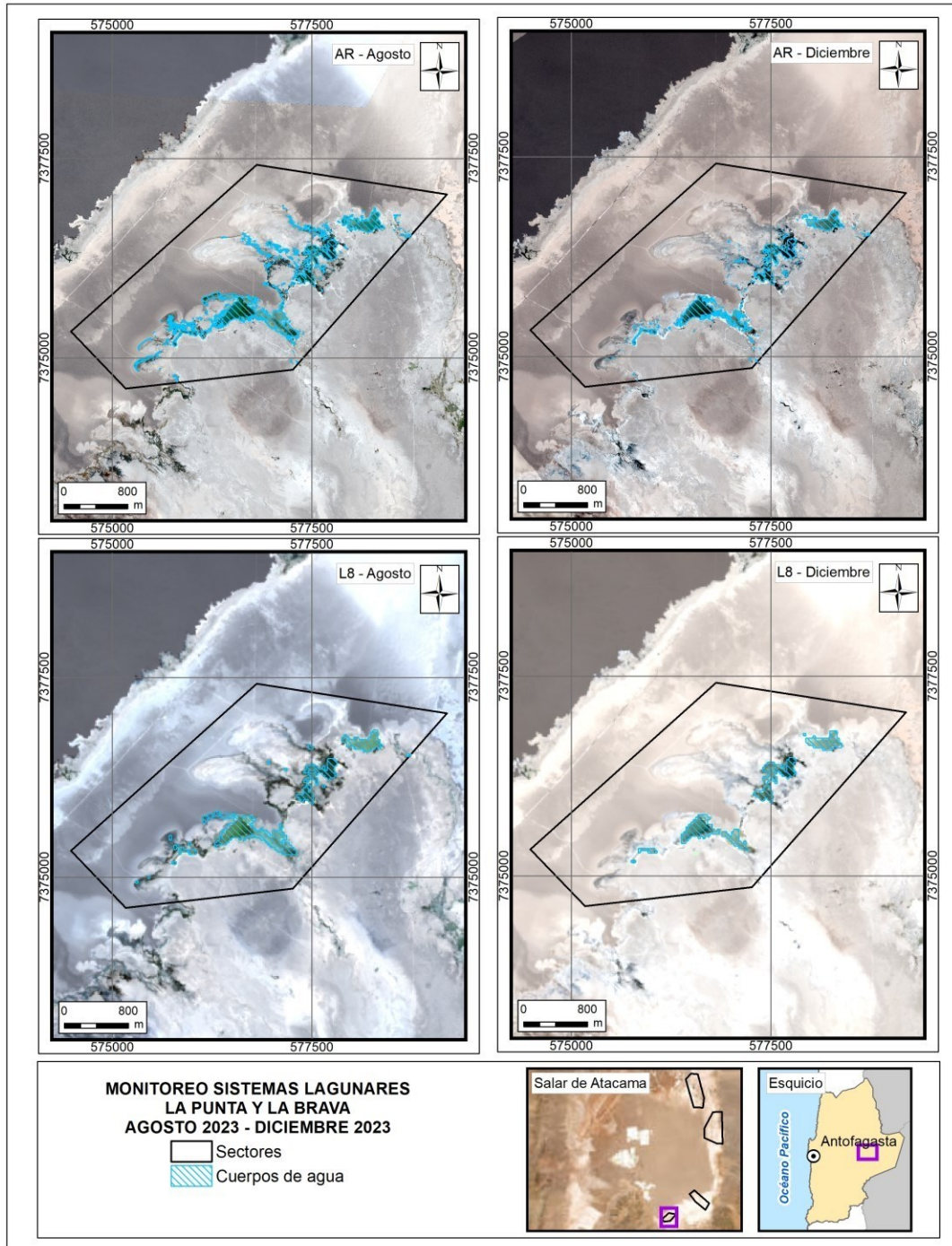
En este sistema lagunar, desde las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 39,4 ha en agosto de 2023, y en diciembre 2023 se calculó que la superficie de estos cuerpos es de 28,8 ha. Los valores de agosto 2023, en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Pleiades sobre Landsat de un +13,5% (+6,1 ha) para este periodo. En diciembre de 2023, la comparativa entre imágenes, muestra una diferencia de Landsat sobre Pleiades de un +7,7% (+2,2 ha) para este periodo. Las variaciones de resultados entre los sensores (Landsat - Pleiades) se deben principalmente a las diferencias en la resolución espacial, es decir, al tamaño de píxel. Esto se traduce en un mayor espesor de los resultados generados por el modelo de resolución media en comparación con un modelo de alta resolución, que proporciona un mayor nivel de detalle. Este incremento en la definición de los bordes o contornos del recubrimiento se logra gracias a la mejora en el contraste y la respuesta espectral ofrecida por las imágenes de alta resolución.

La correlación entre las superficies desde 2016 a 2023 en el sector La Punta - La Brava, calculadas desde de alta resolución (Pleiades) y desde media resolución (Landsat), y según el coeficiente de correlación de Pearson, muestra que las variables tienen una correlación de 0,763¹⁰ lo que indica una relación positiva moderada entre variables ($r^2 = 58,2\%$); mientras que el valor p es de 0,0004 lo que indica que existe significancia estadística de la asociación entre las variables Pleiades y Landsat.

Las Figura N°5-3 a la Figura N°5-6, muestran las superficies de los cuerpos de agua según tipo de imagen por año de monitoreo, desde 2016 a la fecha y su representación espacial respectivamente. Para el sector de La Punta - La Brava, la comparación de la superficie calculada en este sistema revela patrones cíclicos. En los registros de invierno entre 2016 e invierno de 2023, se evidencia un crecimiento constante hasta 2018, seguido de una disminución continua hasta invierno de 2021. Aunque se observa una ligera recuperación en invierno de 2023, se mantiene dentro del rango de los últimos tres inviernos. Entre los veranos de 2016 y 2023, se observa una variación estacional al descenso, con registros desde el verano de 2020 hasta la fecha mostrando coberturas menores en comparación con los veranos de 2016 a 2019. Sin embargo, se destaca un leve aumento en las coberturas de cuerpos de agua en el verano de 2023 con respecto a 2021 y 2022. El seguimiento de verano de 2019 exhibe la máxima cobertura lagunar registrada hasta la fecha. La diferencia marcada entre 2019 y 2021 se atribuye al aumento de precipitaciones, expandiendo los límites naturales de lagunas y canales. En resumen, la tendencia general a lo largo del tiempo muestra un patrón de crecimiento inicial, seguido de una disminución constante y, finalmente, una estabilización en los últimos años.

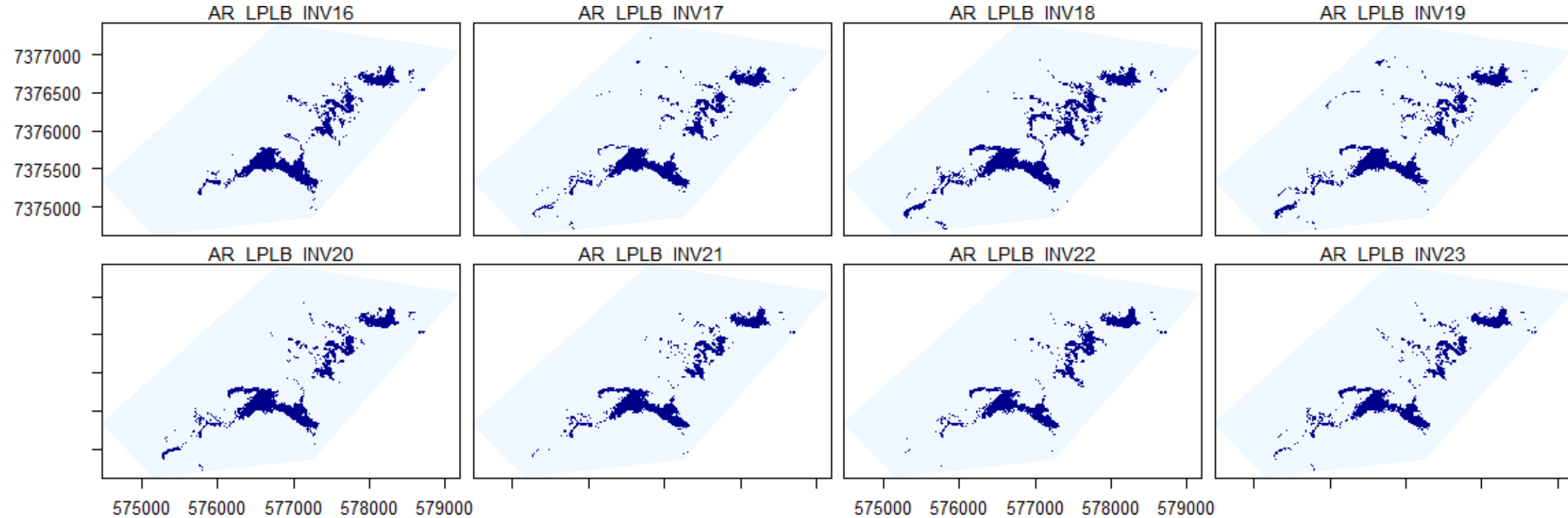
¹⁰ El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

Figura N°5-2. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar La Punta - La Brava, agosto 2023 – diciembre 2023.



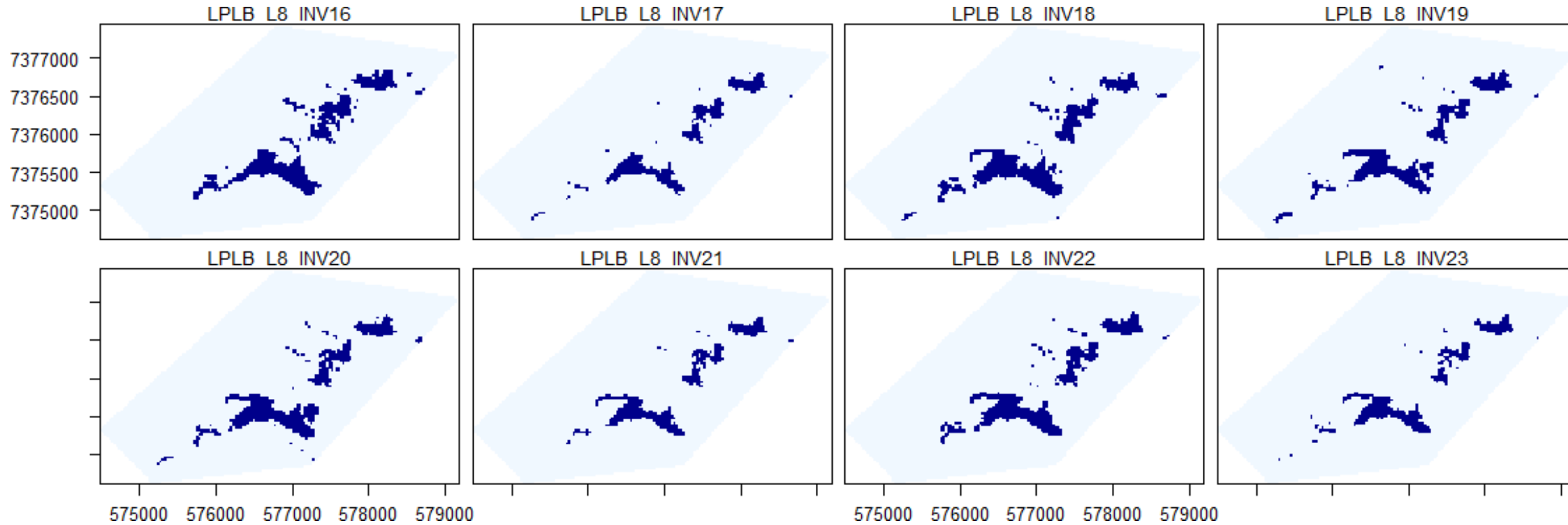
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2023 y diciembre de 2023.

Figura N°5-3. Registros de superficies lagunares de seguimiento (inviernos 2016 a 2023), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1-A.



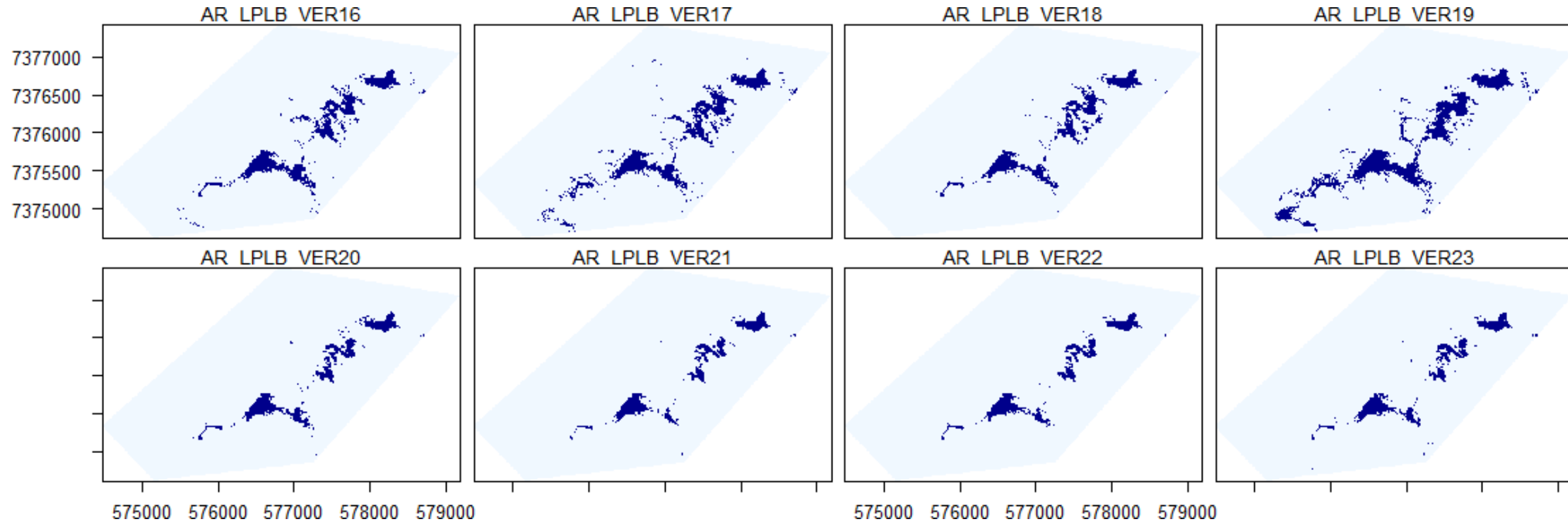
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2023

Figura N°5-4. Registros de superficies lagunares de seguimiento (inviernos 2016 a 2023), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.



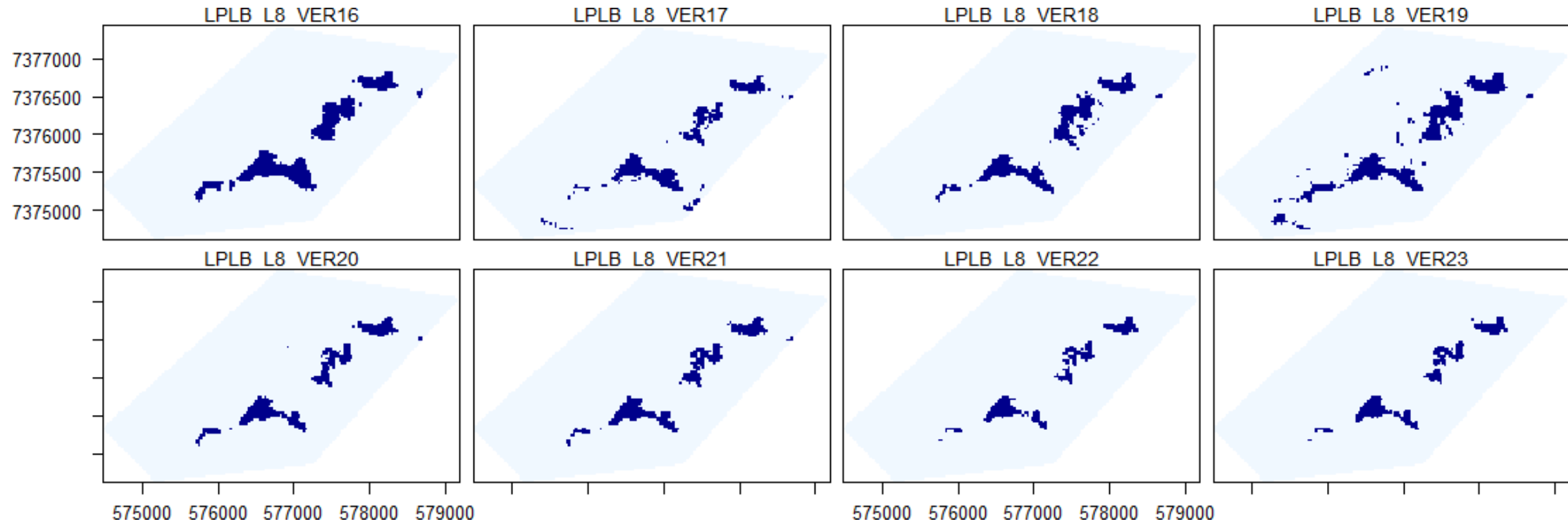
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2023

Figura N°5-5. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1-A.



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2023

Figura N°5-6. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), sector La Punta - La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.

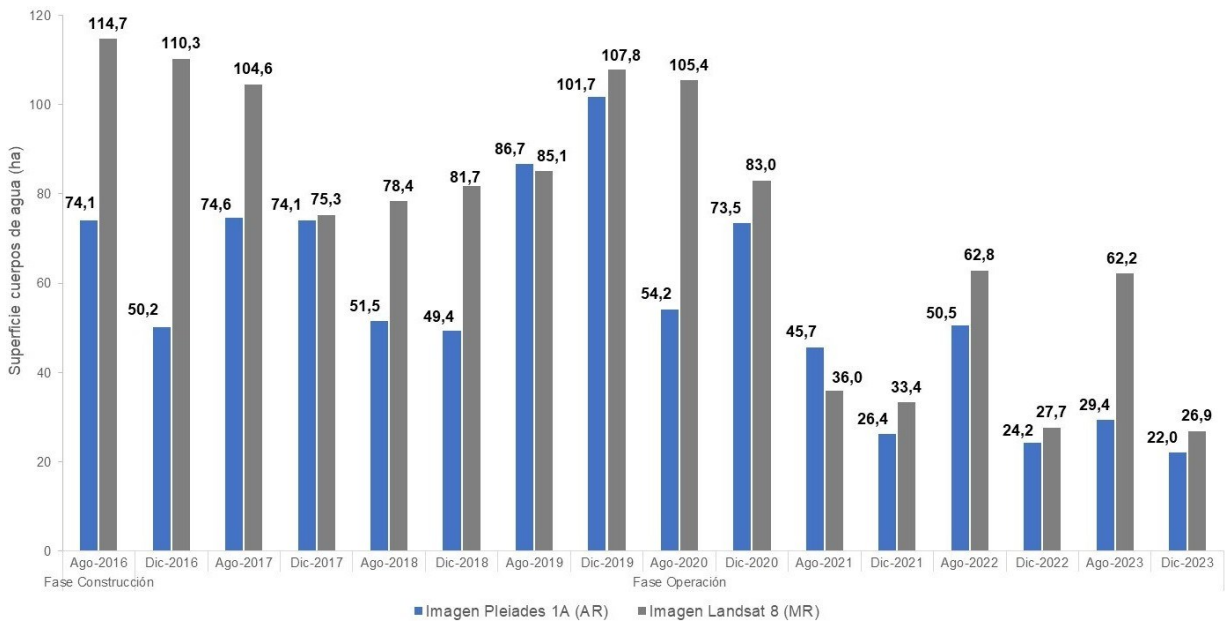


Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2023

5.2.2 Peine

En el sistema lagunar Peine, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades 1-A en agosto de 2023 es de 29,4 ha y en diciembre 2023 abarca una superficie de 22,0 ha (Tabla N°5-5). La Figura N°5-7 y Figura N°5-8, muestran los resultados gráficos y numéricos de las superficies monitoreadas entre 2016 a 2023, desde que se aprobó la RCA 021/2016.

Figura N°5-7. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar Peine.



Dónde; **MR**: Imagen de Mediana Resolución (píxel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (píxel menor a 4m).

Fuente: Cedrem Consultores a partir de modelo de clasificación supervisada.

En el sistema lagunar Peine, desde las imágenes Landsat 8 se calculó una cobertura de cuerpos de agua que abarca una superficie de 62,2 ha en agosto de 2023; estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat sobre Pleiades de un +52,7% (+32,8 ha) para este periodo. Para las imágenes de diciembre 2023 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua en mediana resolución abarca una superficie de 26,9 ha, estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat 8 sobre Pleiades de un +18,0% (+4,9 ha) para este periodo. Estas diferencias son atribuibles principalmente a la resolución espacial de las imágenes de media resolución, que entrega un modelo con bordes menos definidos en comparación al modelo de alta resolución que presenta una mayor definición de los bordes o contorno del recubrimiento agua, por la mejora del contraste y respuesta espectral que otorga las imágenes de alta resolución.

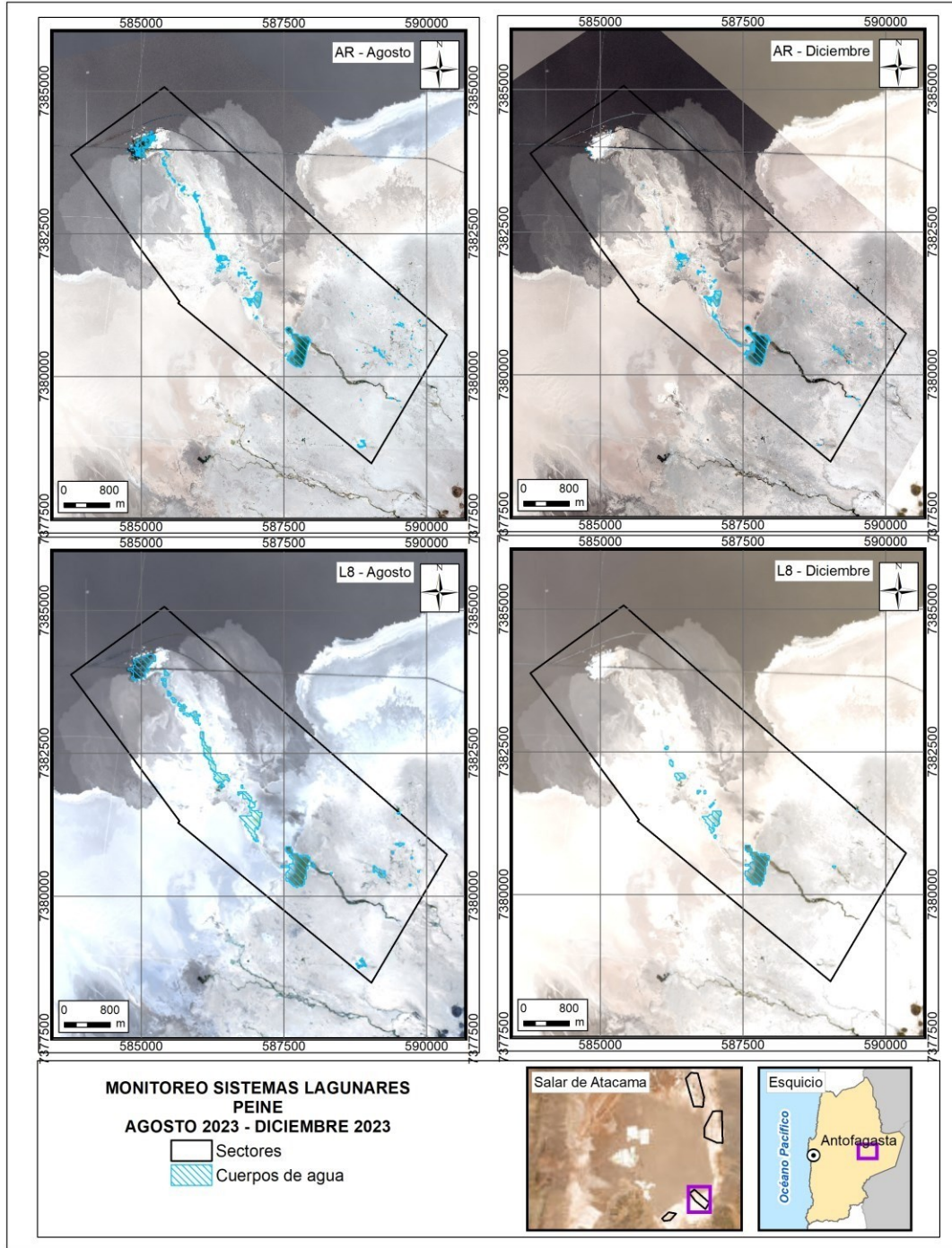
La correlación entre las superficies del sector Peine desde 2016 a 2023, calculadas desde de alta resolución (Pleiades) y desde media resolución (Landsat), y según el coeficiente de correlación de

Pearson, muestra que las variables tienen una correlación de 0,748¹¹ lo que indica una relación positiva moderada entre variables ($r^2 = 56,0\%$); mientras que el valor p es de 0,001 lo que indica que existe significancia estadística de la asociación entre las variables Pleiades y Landsat.

La Figura N°5-9 a la Figura N°5-12, muestran el análisis de las superficies de lagunas en el sector Peine, evidenciando variaciones significativas en su extensión a lo largo de los años. Se observa un menor crecimiento en los inviernos de 2016 y 2017, seguido por una disminución en 2018. En el invierno de 2019, se registra un aumento considerable debido a las precipitaciones. A partir de 2020, se observa nuevamente una disminución persistente hasta 2021. Aunque se presenta una recuperación en el invierno de 2022, en 2023 se experimenta una nueva disminución. Estas fluctuaciones indican la influencia de condiciones climáticas y otros factores en la dinámica de las lagunas. La Laguna Interna destaca como una parte significativa de los cambios, mostrando variaciones notables en su zona de inundación. En el verano de 2023, se observa una mayor disminución en las zonas de interconexión entre la Laguna Interna y la Laguna Salada. Además, el análisis de imágenes de alta resolución revela una reducción en las coberturas de cuerpos de agua desde el verano de 2021, especialmente en las áreas de Laguna Interna y Saladita, debido a variaciones en la inundación.

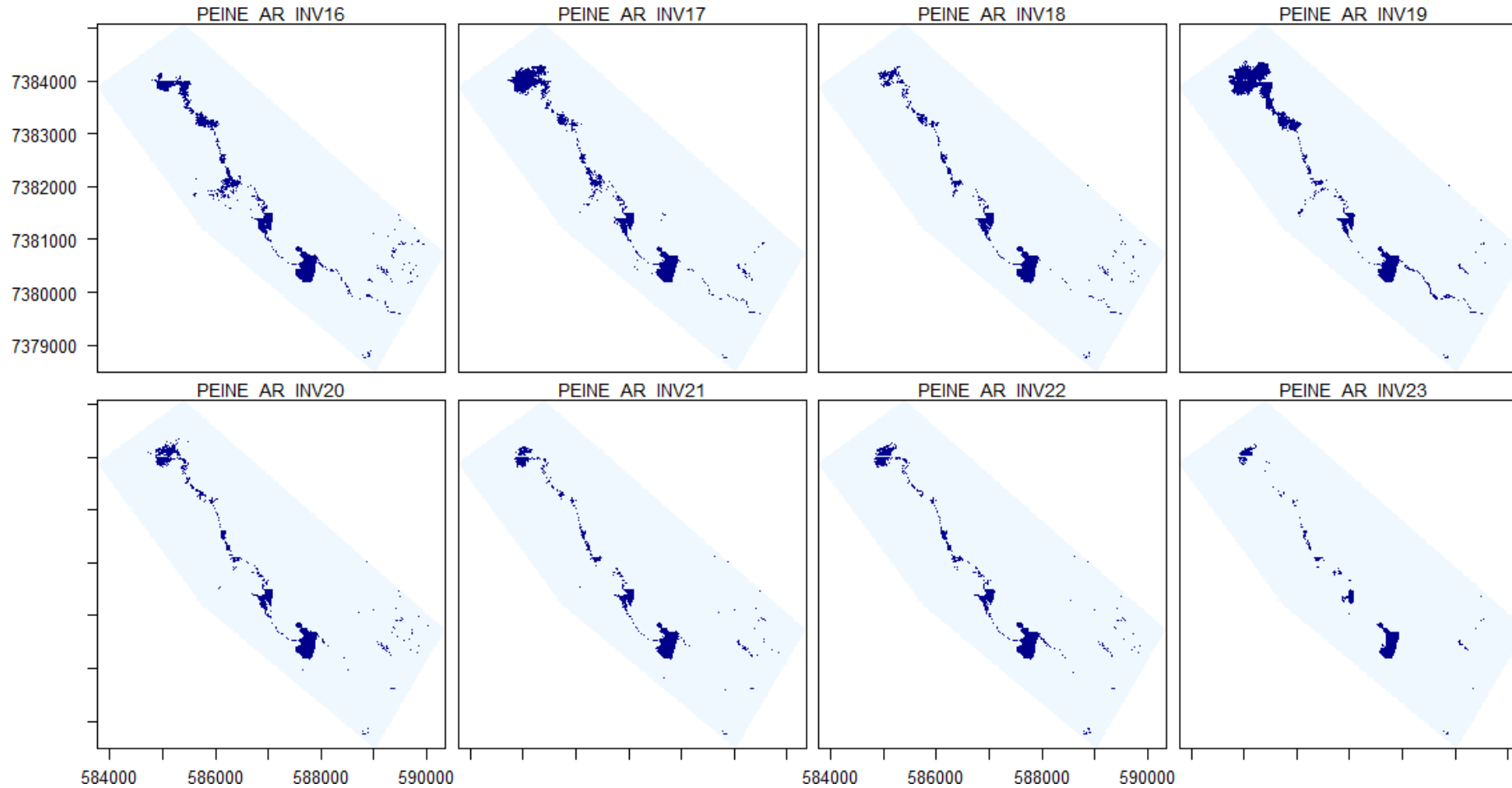
¹¹ El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

Figura N°5-8. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Peine, agosto – diciembre 2023.



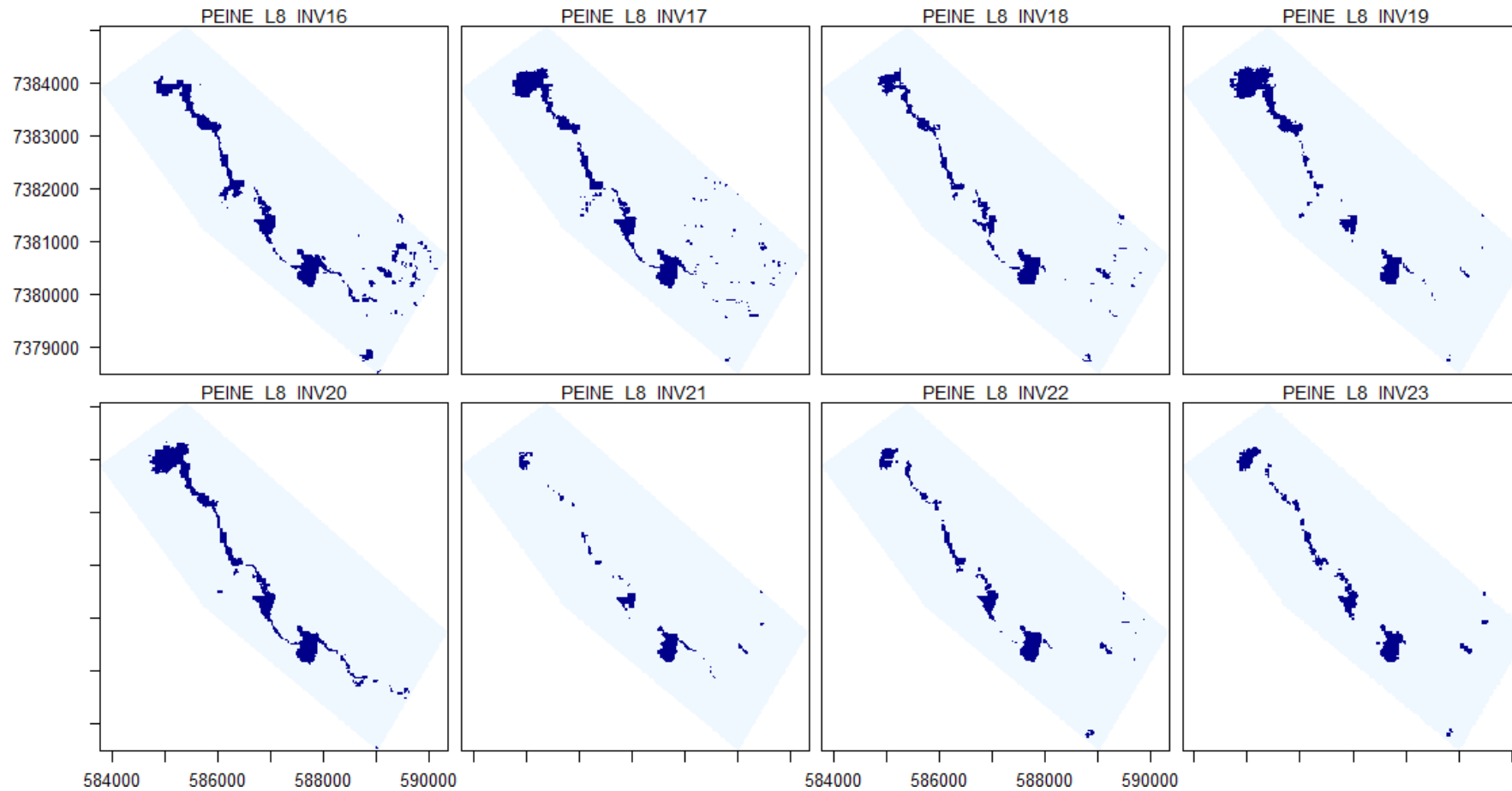
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre 2023.

Figura N°5-9. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1-A.



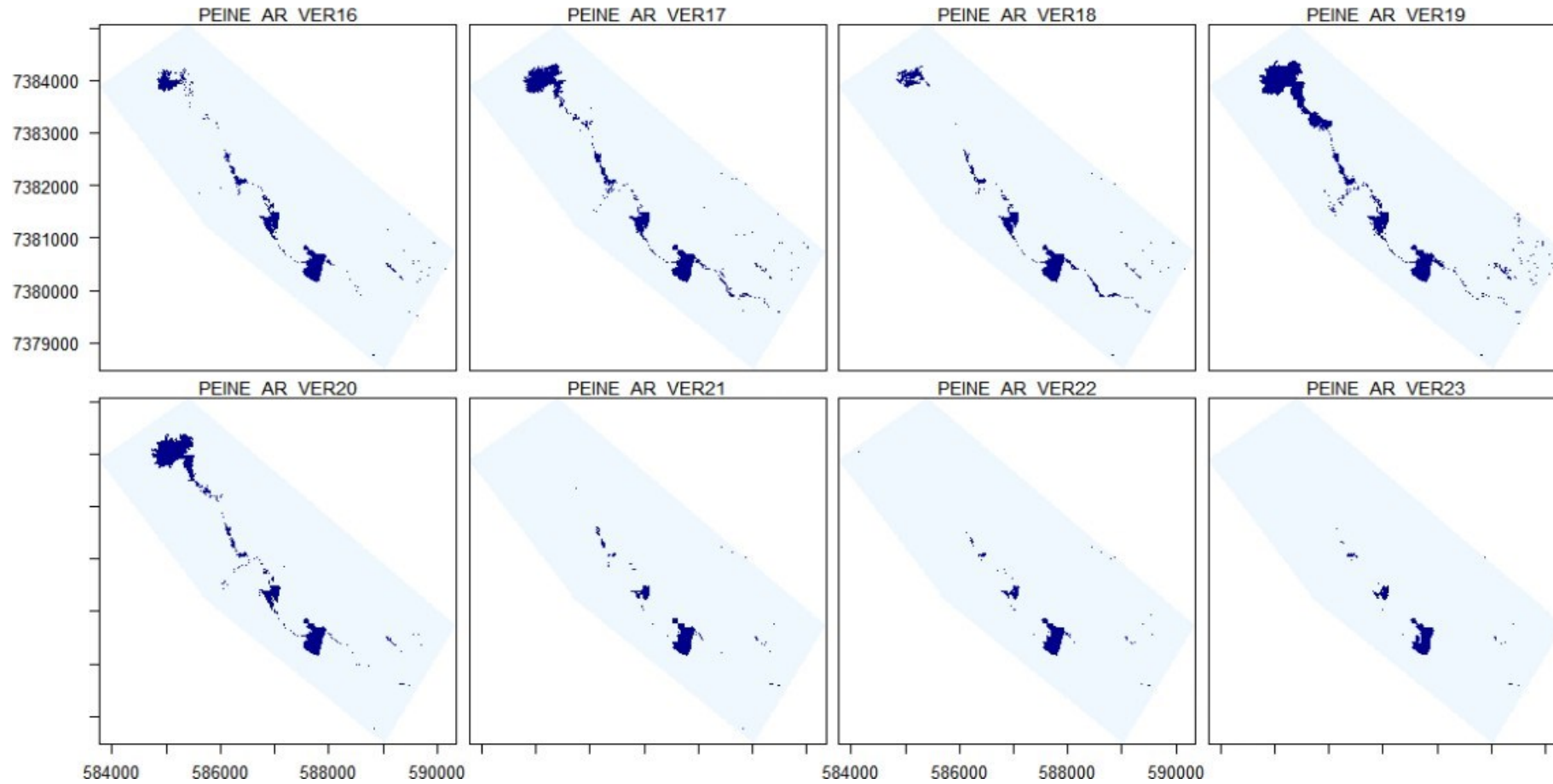
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2023.

Figura N°5-10. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.



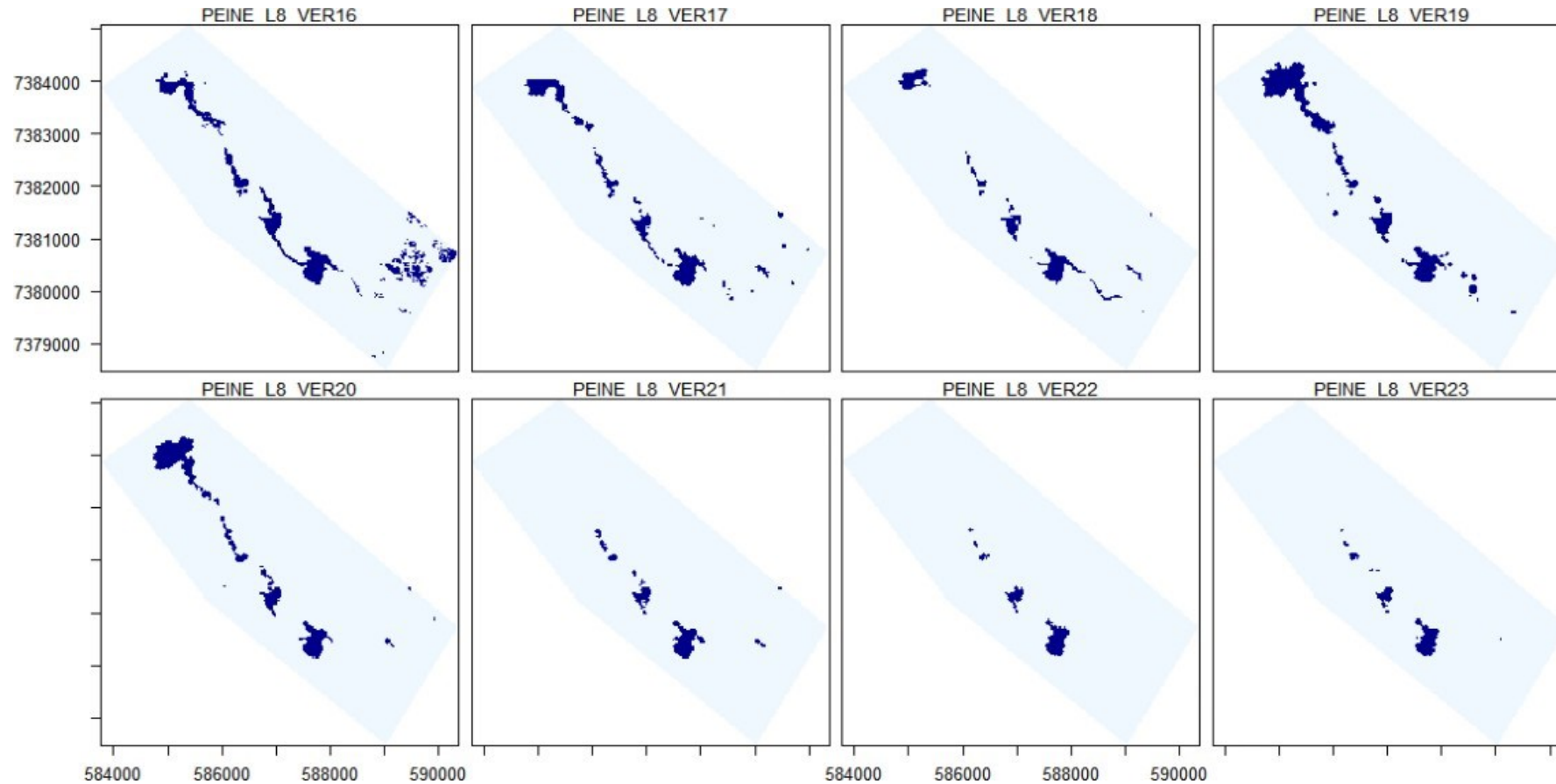
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2023.

Figura N°5-11. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1-A.



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2023.

Figura N°5-12. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.

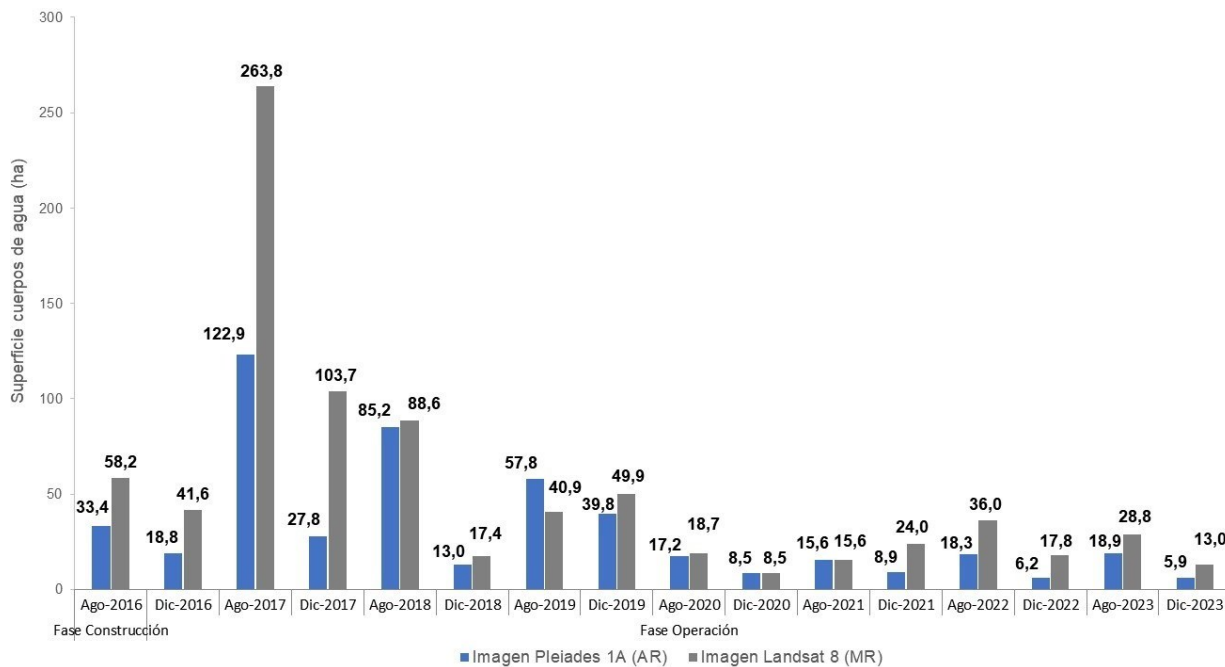


Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2023.

5.2.3 Aguas de Quelana

En el sistema lagunar Aguas de Quelana, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades 1-A en agosto de 2023 es de 18,9 ha y en diciembre 2023 abarca una superficie de 5,9 ha (Tabla N°5-5). La Figura N°5-13 y Figura N°5-14 muestran los resultados gráficos y numéricos de las superficies monitoreadas entre 2016 a 2023, desde la aprobación de la RCA 021/2016.

Figura N°5-13. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua sistema lagunar Aguas de Quelana



Dónde; **MR:** Imagen de Mediana Resolución (píxel 30m); **AR:** Imágenes de alta resolución (píxel menor a 4m).

Fuente: Cedrem Consultores a partir de modelo de clasificación supervisada.

En el sistema lagunar Aguas de Quelana, desde las imágenes Landsat 8 se calculó una cobertura de cuerpos de agua que abarca una superficie de 28,8 ha en agosto de 2023; estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de +9,9 ha de Landsat 8 sobre Pleiades 1-A. Para las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 13,0 ha en diciembre de 2023, estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat 8 sobre Pleiades 1-A de +7,1 ha para este periodo. Según los resultados observados por tipo de imagen, se observa que también en este sector las principales diferencias son atribuibles a la resolución espacial de las imágenes de media resolución. En el análisis de los resultados obtenidos durante los monitoreos de agosto de 2017 y diciembre de 2017, se destaca una marcada diferencia entre las imágenes capturadas por Landsat 8 y Pleiades 1-A. La mayor resolución de Pleiades 1-A aumentó la cobertura de las áreas inundadas, resultado de la interconexión de lagunas por desborde. Como resultado se produjo un aumento general en la superficie total en comparación con los resultados obtenidos usando la imagen Pleiades-1A donde, dada la resolución de

esta imagen, se logró una delimitación más definida en los bordes. No obstante, a lo largo de los monitoreos sucesivos, se observa un progresivo acercamiento en las discrepancias entre lo obtenido para ambos tipos de imágenes, lo que estaría ligado al descenso de precipitaciones que puedan ocasionar el desborde de lagunas y canales, y por lo tanto la mejor respuesta de los sensores a cuerpos de agua pequeños y mejor delimitados.

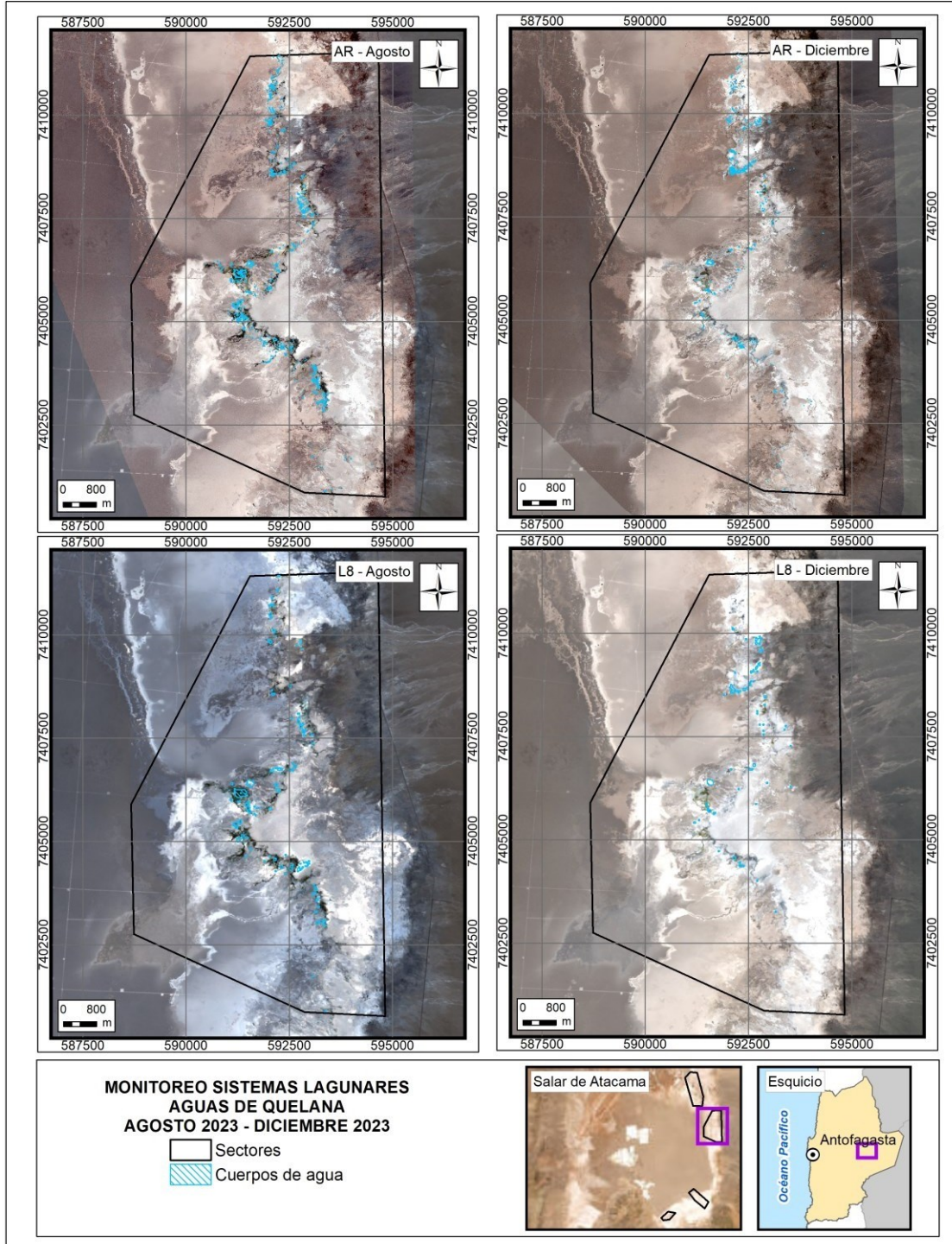
La correlación entre las superficies del sector Aguas de Quelana desde 2016 a 2023, calculadas desde de alta resolución (Pleiades) y desde media resolución (Landsat), y según el coeficiente de correlación de Pearson, muestra que las variables tienen una correlación de 0,878¹² lo que indica una relación positiva alta entre variables ($r^2 = 77,1\%$); mientras que el *valor p* es de 0,000004, lo que indica que existe significancia estadística de la asociación entre las variables Pleiades y Landsat.

Desde la Figura N°5-15 a la Figura N°5-18, muestran los cambios en las superficies de los cuerpos de agua, desde 2016 a 2023, y su representación espacial respectivamente. Entre las principales diferencias entre registros, se observa la disminución de los pequeños cuerpos de agua que se reparten en faja central del sector Aguas de Quelana, asociadas principalmente con vegetación ribereña, y la contracción de zonas de inundación que surgen de la interconexión de estos pequeños cuerpos.

Se destacan las diferencias observadas al comparar los registros de invierno y verano, siendo una de las más evidentes la disminución en verano de los pequeños cuerpos de agua que muestran una reducción en su extensión y número. Además, se evidencia una contracción en las zonas de inundación que se originan a partir de la interconexión de estos pequeños cuerpos de agua al presentarse eventos de precipitación. La reducción en la extensión de estos humedales y áreas inundadas se ve acrecentada en los meses de verano desde diciembre de 2019.

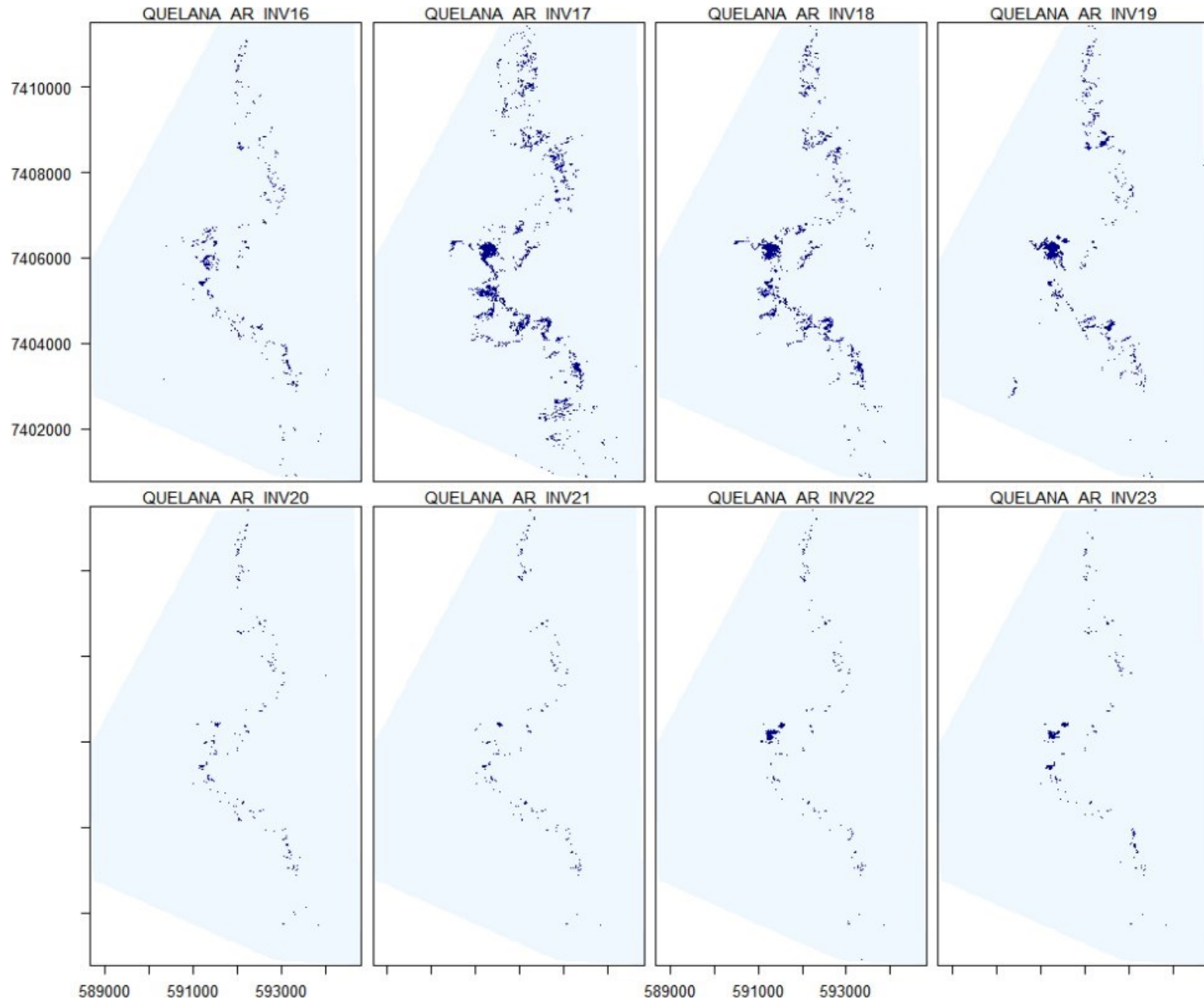
¹² El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a +1. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

Figura N°5-14. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Aguas de Quelana, agosto – diciembre 2023.



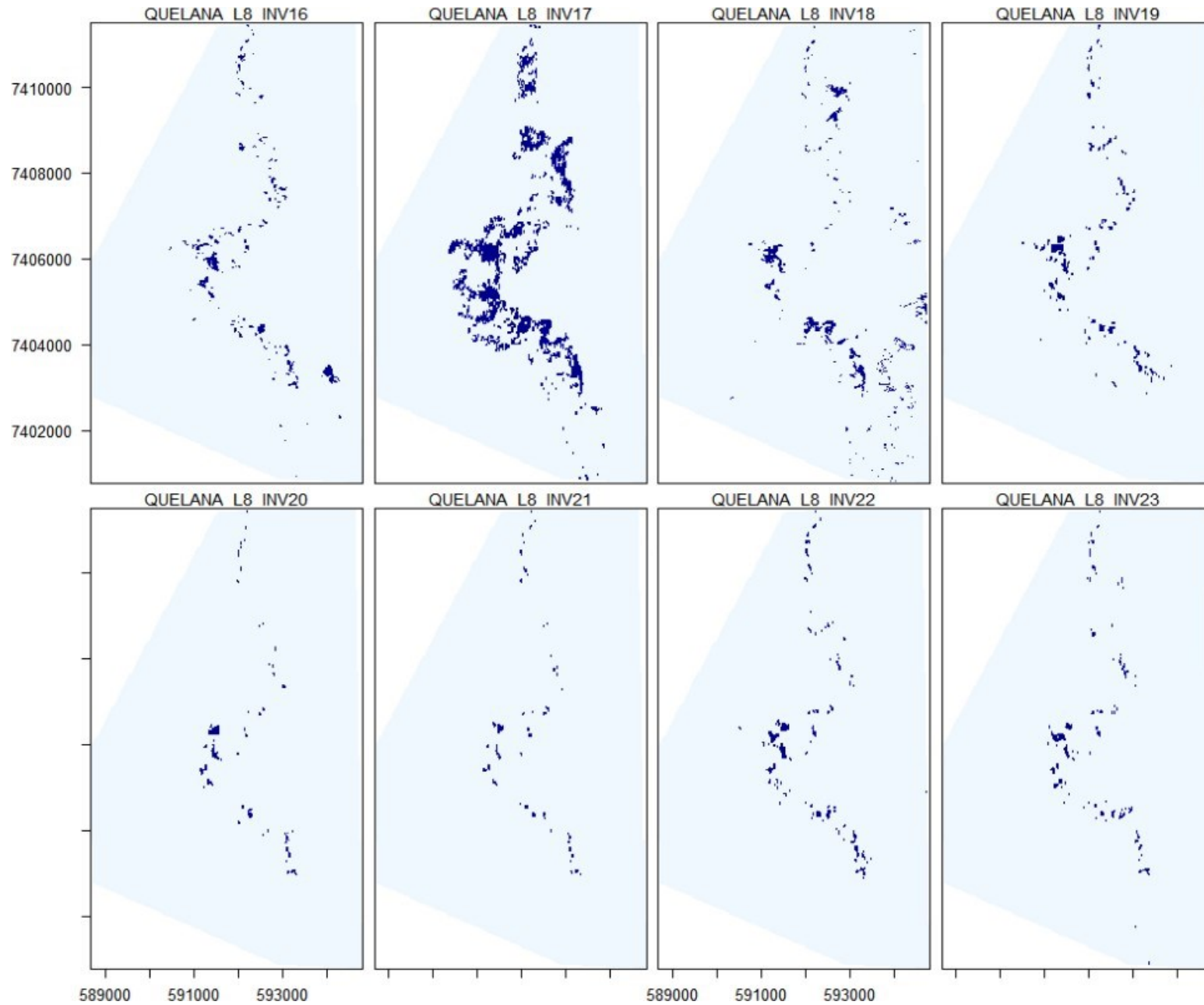
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre 2023.

Figura N°5-15. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Aguas de Quelana, a partir de Pleiades 1-A.



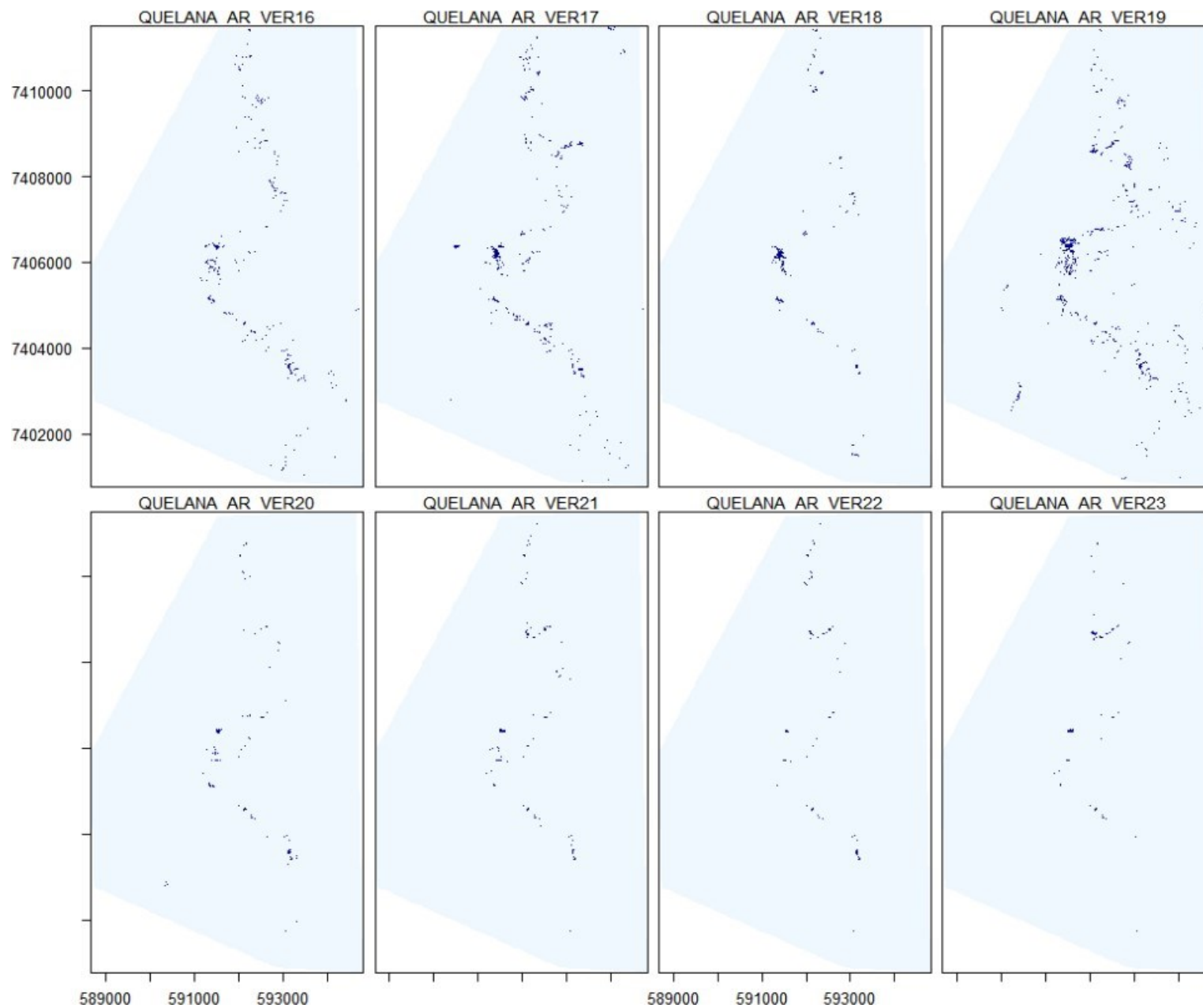
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2023.

Figura N°5-16. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Aguas de Quelana, de imágenes Landsat 8.



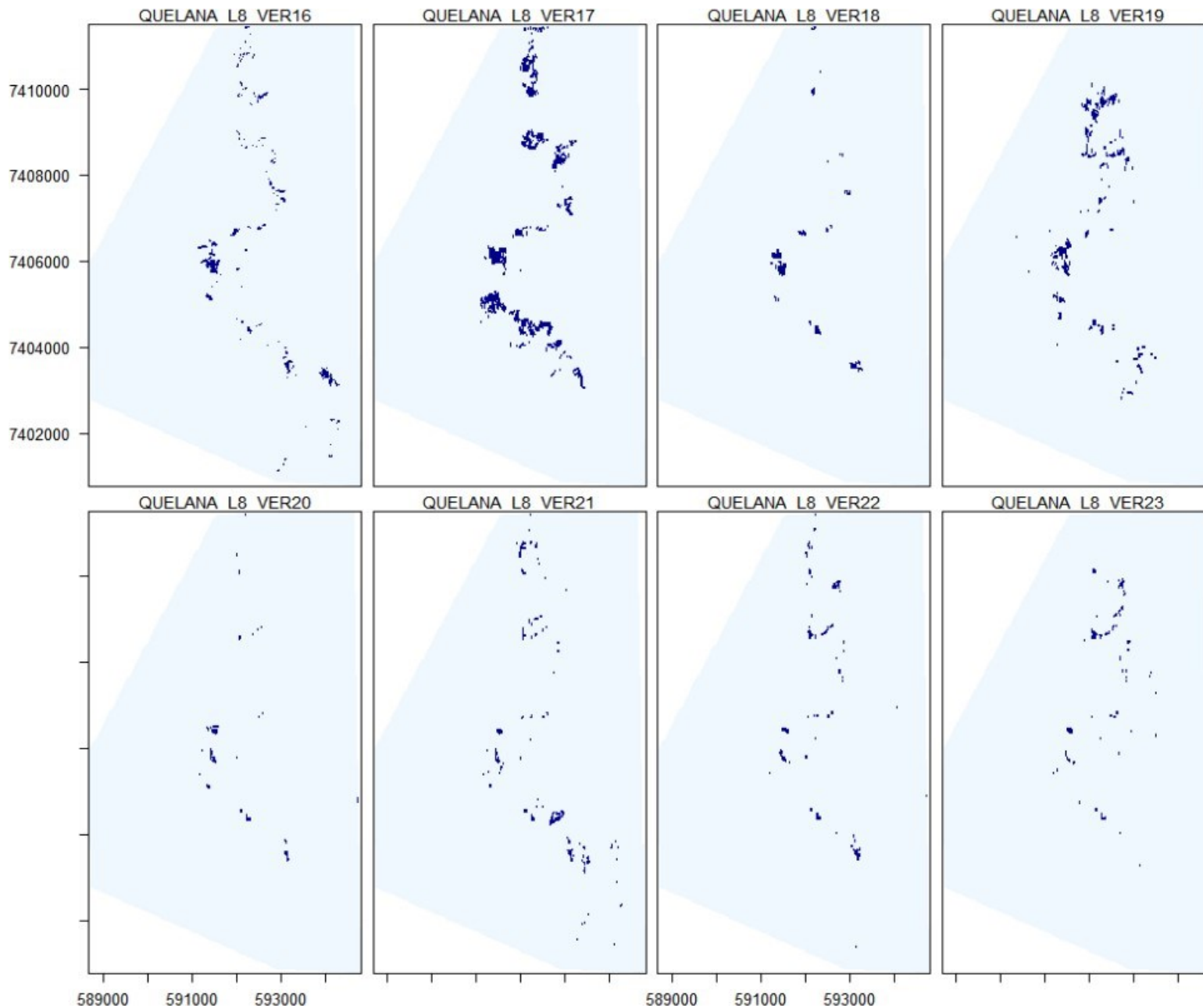
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a 2023.

Figura N°5-17. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A.



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2023.

Figura N°5-18. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos (diciembre 2016 a 2023), sector Aguas de Quelana, Landsat 8.

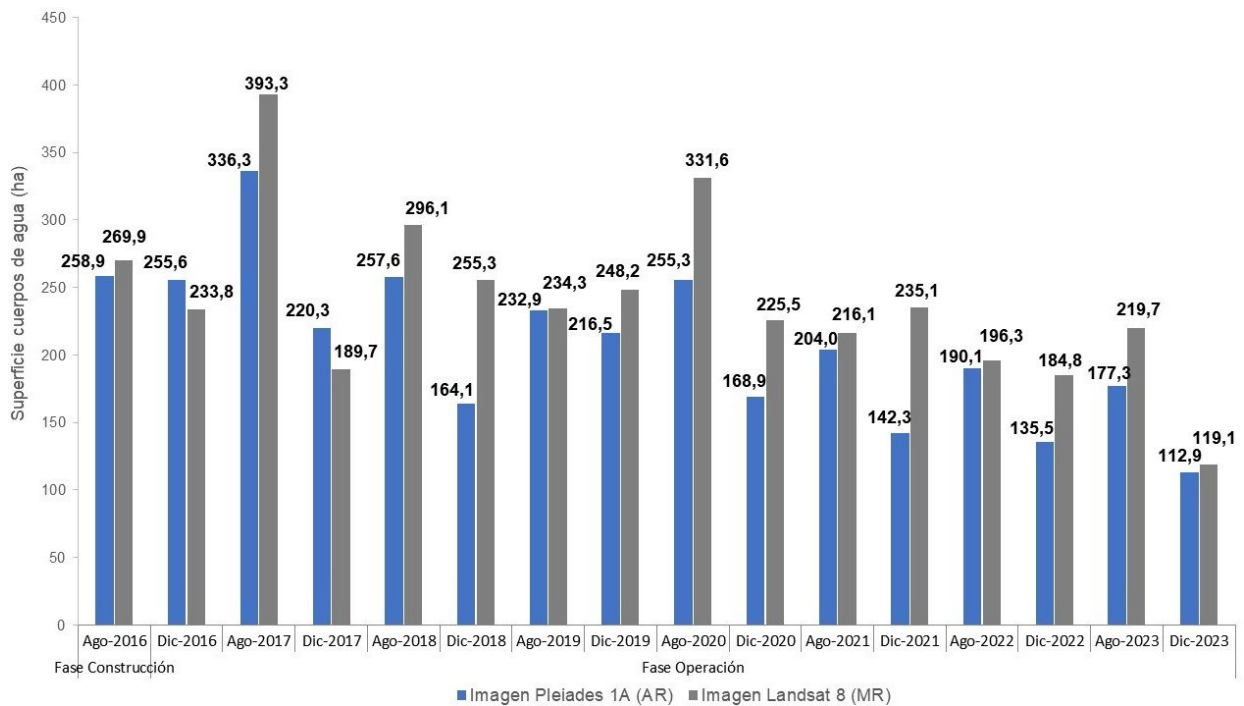


Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2023.

5.2.4 Soncor

En el sistema lagunar Soncor, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades 1-A en agosto de 2023 es de 177,3 ha y en diciembre 2023 abarca una superficie de 112,9 ha (Tabla N°5-5). La Figura N°5-19 y Figura N°5-20 muestran los resultados gráficos y numéricos de las superficies monitoreadas entre 2016 a 2023, desde la aprobación de la RCA 021/2016.

Figura N°5-19. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar Soncor.



Dónde; **MR**: Imagen de Mediana Resolución (píxel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (píxel menor a 4m).

Fuente: Cedrem Consultores a partir de modelo de clasificación supervisada.

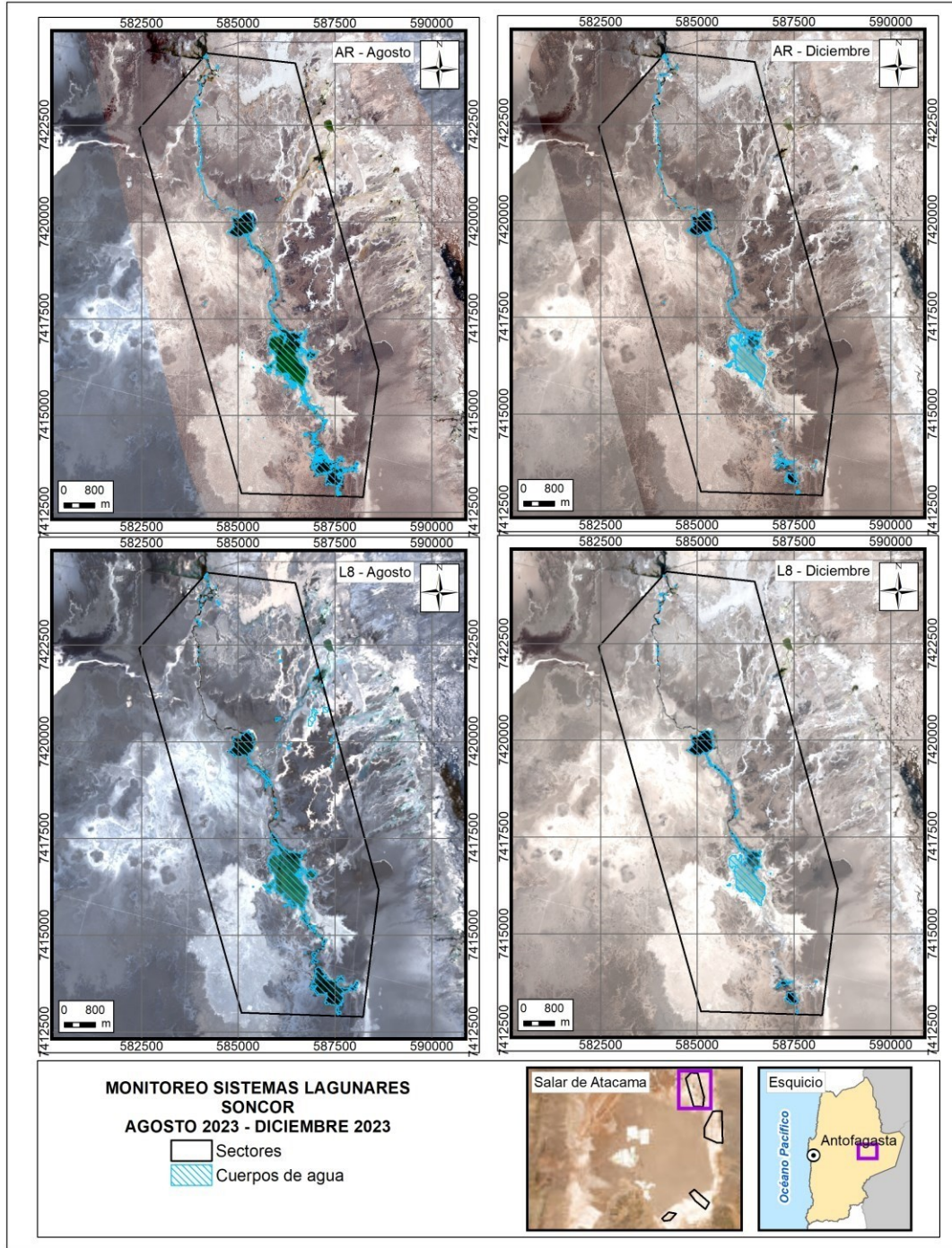
En este sistema lagunar, desde las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 219,7 ha en agosto de 2023 y 119,1 ha en diciembre de 2023. Estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat 8 sobre Pleiades 1-A de +42,4 ha para agosto de 2023 y de +6,2 ha para verano de 2023. Según los resultados observados por tipo de imagen, se observa que las principales diferencias son atribuibles principalmente a la resolución espacial de las imágenes Landsat 8, que entrega un modelo con bordes menos definidos en comparación al modelo de alta resolución; sin embargo estas diferencias son menores en comparación a otros sistemas lagunares, dada la fisonomía del sector (cuerpo de agua confinado en una costra salina muy diferenciable como recubrimiento y sin sectores de combinación agua – vegetación o similares) por lo que los resultados desde los parámetros están mejor ajustados.

La correlación entre las superficies del sector Soncor desde 2016 a 2023, calculadas desde de alta resolución (Pleiades 1-A) y desde media resolución (Landsat 8), y según el coeficiente de correlación de Pearson, muestra que las variables tienen una correlación de 0,814¹³ lo que indica una relación positiva entre variables ($r^2 = 66,3\%$); mientras que el valor p es de 0,0001 lo que indica que existe significancia estadística de la asociación entre las variables Pleiades y Landsat.

Las Figura N°5-21 a la Figura N°5-24 muestran los cambios en las superficies de los cuerpos de agua, desde 2016 a 2023, y su representación espacial respectivamente. Para el sector de Soncor, las principales diferencias entre monitoreos se observan en la zona sur del sistema y por derrames de la laguna Barros Negros al sector de entrada oeste, cuyas variaciones contribuyen aumentando o disminuyendo las superficies calculadas para los cuerpos de agua.

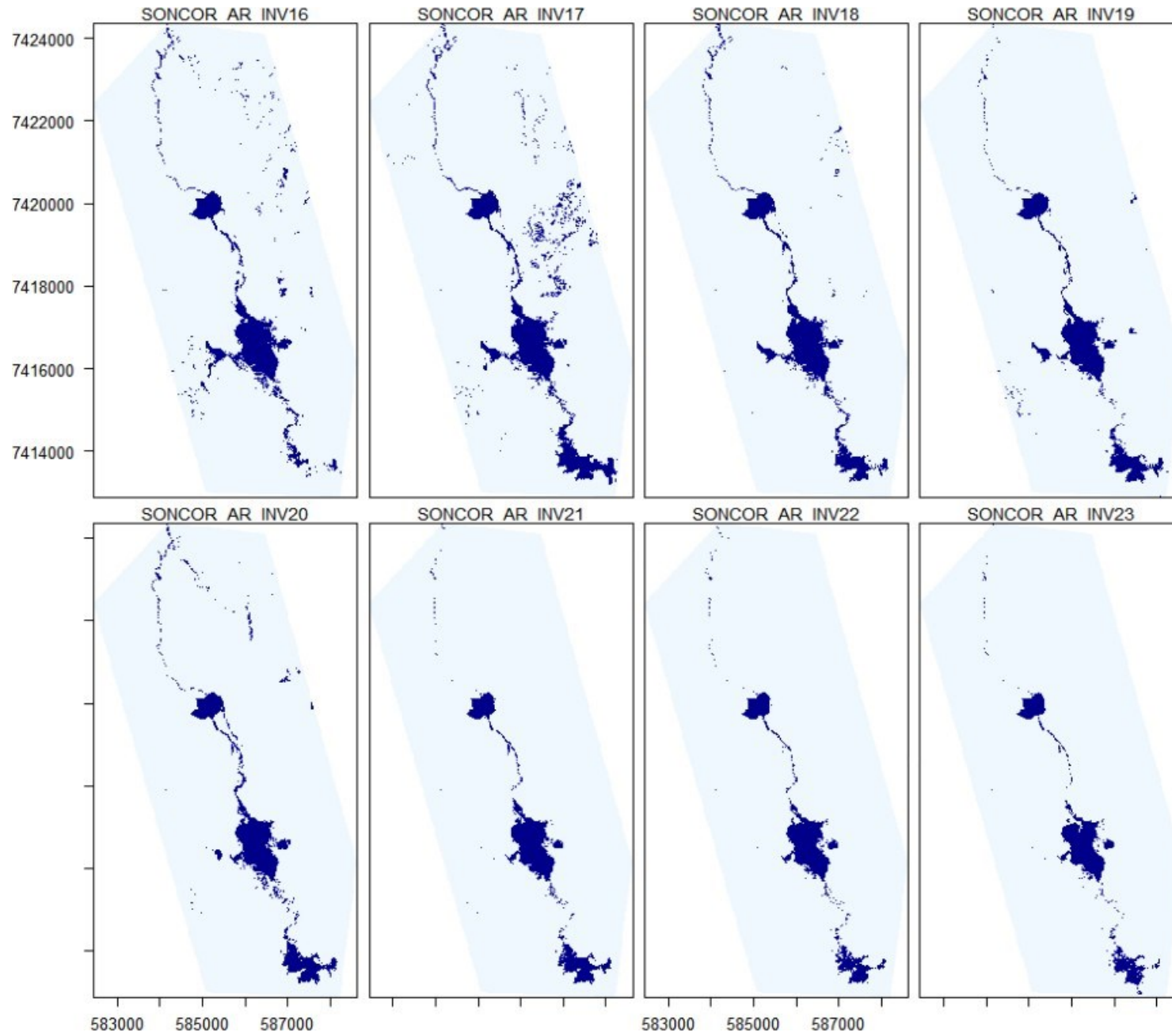
¹³ El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

Figura N°5-20. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1-A y Landsat 8 en el sistema lagunar Soncor, agosto – diciembre 2023



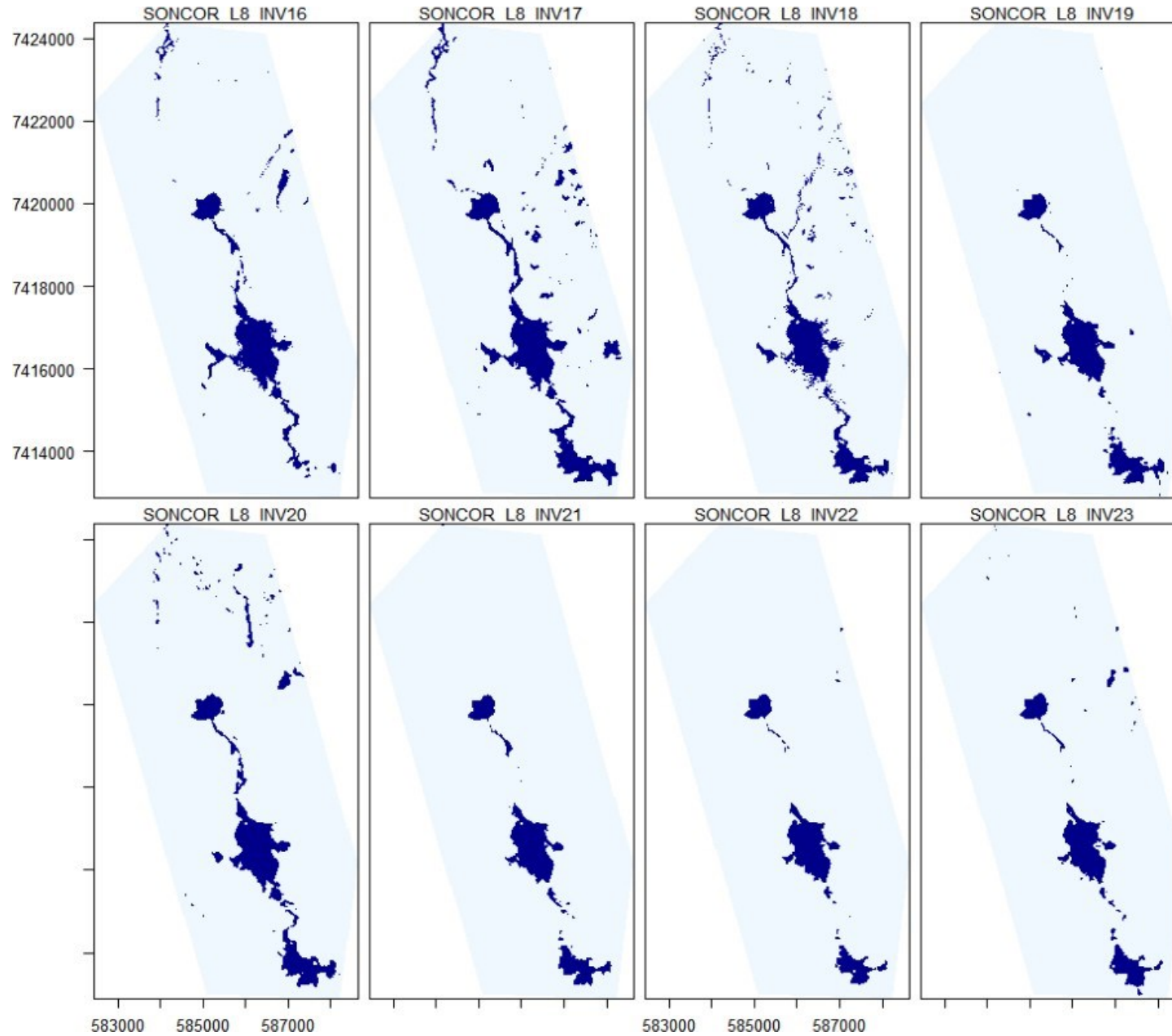
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre 2023.

Figura N°5-21. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1-A.



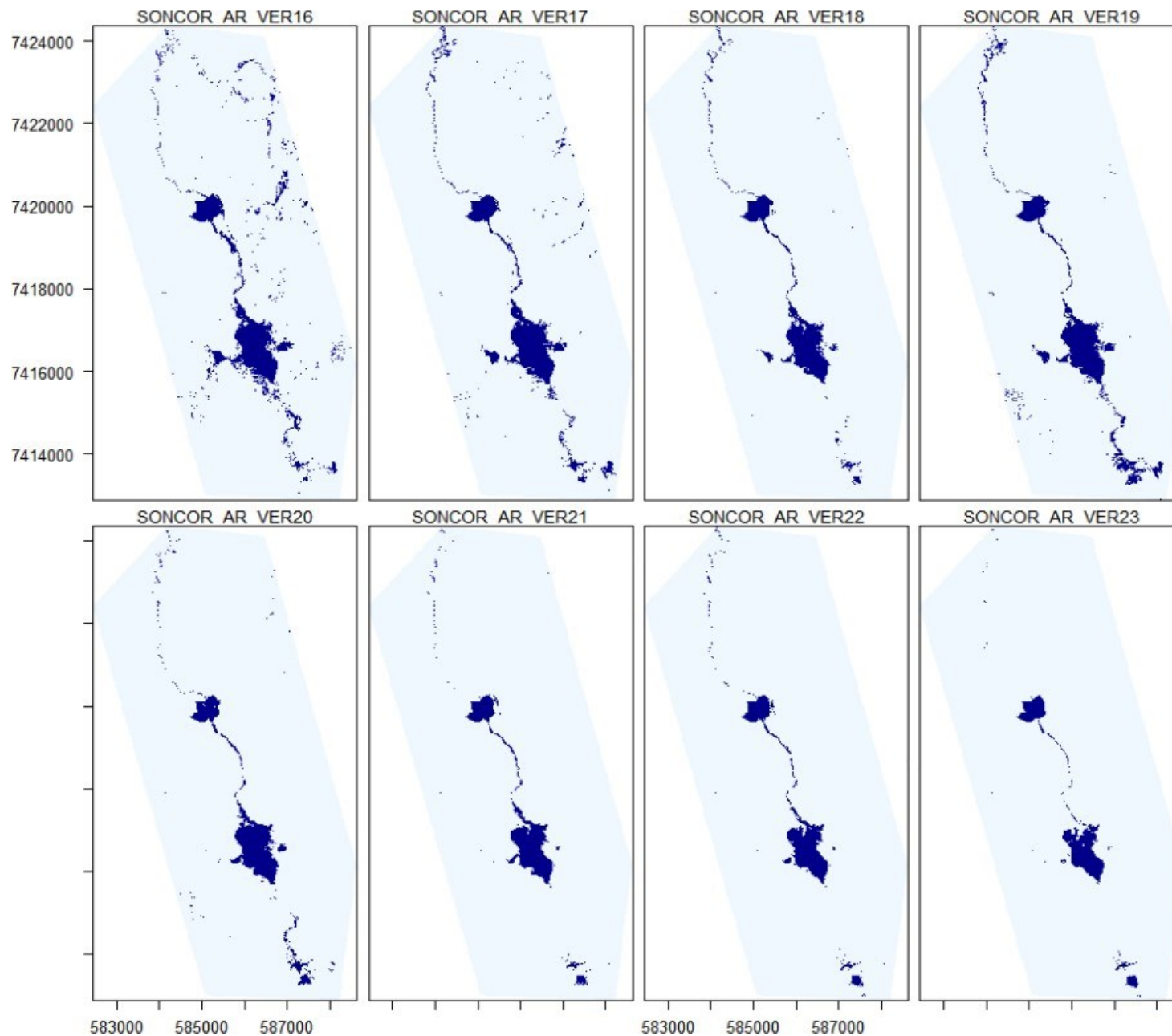
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2023.

Figura N°5-22. Registros de superficies lagunares de seguimiento inviernos (agosto 2016 a 2023), sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8.



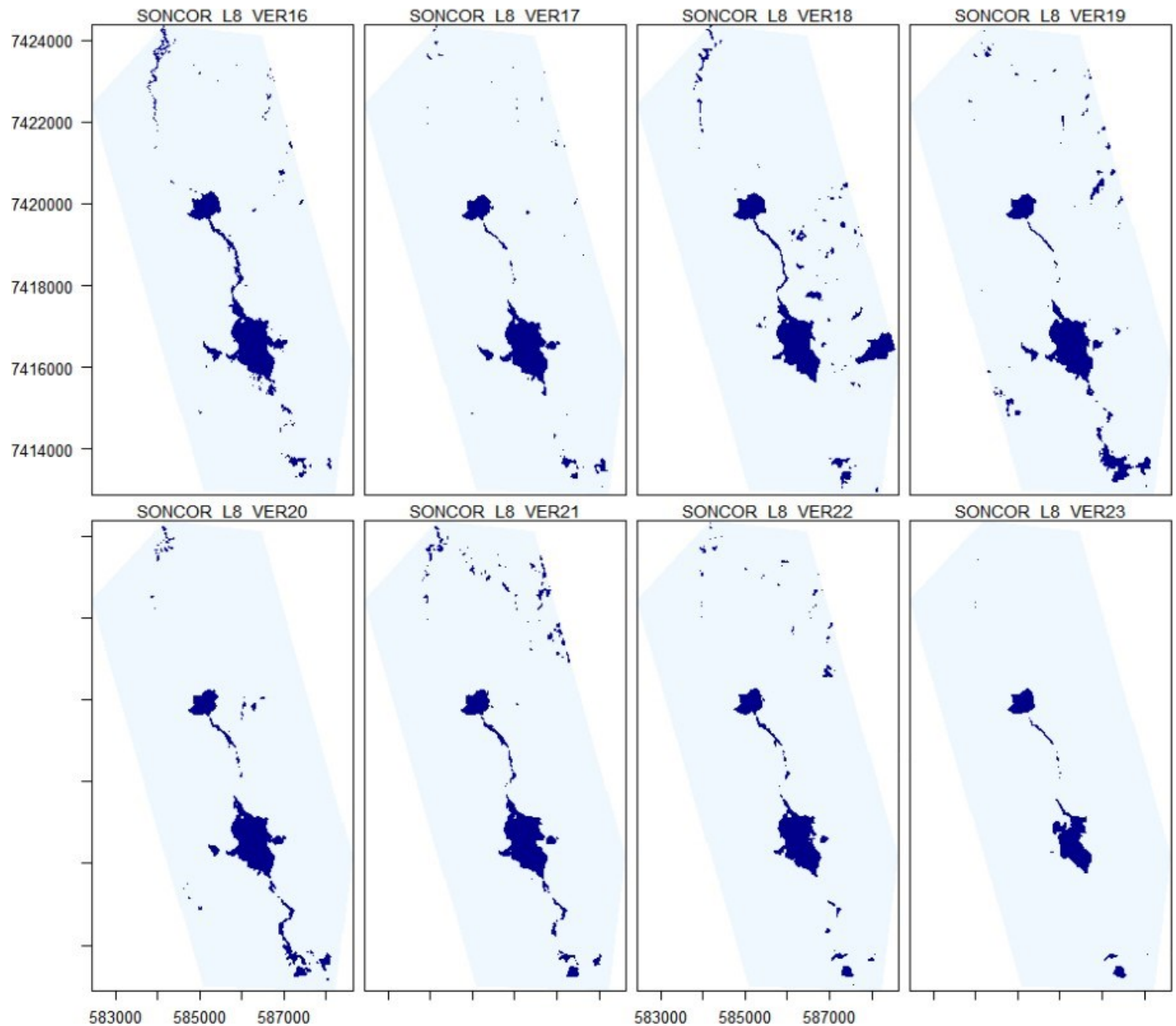
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2023.

Figura N°5-23. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos(diciembre 2016 a 2023), sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1-A.



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2023

Figura N°5-24. Registros de superficies lagunares de seguimiento veranos(diciembre 2016 a 2023), sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8.



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2023

5.3 Límites considerados en el seguimiento de los cuerpos de agua

Considerando el criterio indicado en la RCA N°21/2016, se tiene que “*durante la fase de operación y cierre del proyecto la superficie cubierta por lagunas debe mantener sus límites sobre el mínimo histórico*”, lo que se analiza en detalle en capítulo siguiente.

6 DISCUSION

6.1 Análisis de la validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua

En general, el modelo de clasificación presenta ajustes que van de *acceptable a casi perfecto*¹⁴ para todos los sistemas lagunares (Tabla N°6-1), con valores promedio del índice *Kappa* para el periodo 2016 – 2023 que van entre 0,90 (Soncor) y 0,64 (Aguas de Quelana) desde imágenes de alta resolución; con un valor mínimo *acceptable* de 0,37 en Aguas de Quelana para diciembre del 2020 y un valor máximo *casi perfecto* de 0,98 para Soncor en agosto 2020. Respecto de Landsat 8, los valores promedio del índice *Kappa* observados en el periodo 2016 – 2023 van entre 0,83 (Soncor) y 0,57 (La Punta - La Brava), presentando un valor mínimo de 0,41 en La Punta - La Brava para agosto de 2023 y un valor máximo de 0,94 para Soncor en agosto 2022 y 2023.

De lo anterior, se señala que los mayores ajustes corresponden a los sectores que muestran una mayor definición de los cuerpos de agua, por sus características de topografía y tipo de sustrato, ya que se encuentran total o parcialmente delimitados por una diferencia de nivel de costra salina; por lo tanto, las respuestas espectrales son más claras, facilitando la determinación de umbrales de los parámetros del modelo y la clasificación final es mayormente coincidente con los determinado en terreno o por fotointerpretación visual. Así mismo, los valores más bajos en el ajuste del modelo se reportan principalmente en sectores que muestran un gradiente de vegetación en los bordes lagunares, conformando un ecotono de vegetación, el cual conduce a una estimación menos precisa de los límites de la superficie de agua proveniente principalmente de los parámetros NDVI y NIR, esto ocurre especialmente en invierno o en aumentos de las superficies inundadas, periodos en que la humedad del suelo alcanza mayores superficies combinados con otros recubrimientos (vegetación); sin embargo, otro factor sería el retroceso de zonas inundadas con la exposición del sustrato que muchas veces está asociado a otros componentes como microorganismos, o que en las que se acentúa la discontinuidad de las inundaciones generando parches que no son captados como unidades independientes, disminuyendo la precisión en sitios de transición seca - húmeda.

¹⁴ Los rangos de valores para *Kappa* son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

Tabla N°6-1. Consolidado de índices *Kappa* de validación del modelo de clasificación para imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8.

Tipo de imagen	Fecha monitoreo	Indicadores de monitoreo	Sistema Lagunar			
			La Punta - La Brava	Peine	Aguas de Quelana	Soncor
PLEIADES 1A -AR	ago-16	Superficie (ha)	47,4	74,1	33,4	258,9
		<i>Indice Kappa</i>	0,45	0,89	0,72	0,89
	dic-16	Superficie (ha)	40,9	50,2	18,8	255,6
		<i>Indice Kappa</i>	0,82	0,91	0,86	0,90
	ago-17	Superficie (ha)	48,1	74,6	122,9	336,3
		<i>Indice Kappa</i>	0,50	0,86	0,55	0,83
	dic-17	Superficie (ha)	48,6	74,1	27,8	220,3
		<i>Indice Kappa</i>	0,73	0,83	0,59	0,84
	ago-18	Superficie (ha)	61,9	51,5	85,2	257,6
		<i>Indice Kappa</i>	0,78	0,88	0,67	0,85
	dic-18	Superficie (ha)	35,9	49,4	13,0	164,1
		<i>Indice Kappa</i>	0,83	0,80	0,75	0,94
	ago-19	Superficie (ha)	52,8	86,7	57,8	232,9
		<i>Indice Kappa</i>	0,66	0,83	0,66	0,92
	dic-19	Superficie (ha)	62,7	101,7	39,8	216,5
		<i>Indice Kappa</i>	0,79	0,91	0,76	0,95
	ago-20	Superficie (ha)	51,4	54,2	17,2	255,3
		<i>Indice Kappa</i>	0,64	0,96	0,88	0,98
	dic-20	Superficie (ha)	28,4	73,5	8,5	168,9
		<i>Indice Kappa</i>	0,62	0,73	0,37	0,94
	ago-21	Superficie (ha)	45,8	45,7	15,6	204,0
		<i>Indice Kappa</i>	0,80	0,92	0,69	0,91
	dic-21	Superficie (ha)	24,1	26,4	8,9	142,3
		<i>Indice Kappa</i>	0,61	0,78	0,67	0,92
	ago-22	Superficie (ha)	45,1	50,5	18,3	190,1
		<i>Indice Kappa</i>	0,67	0,90	0,57	0,95
	dic-22	Superficie (ha)	25,3	24,2	6,2	135,5
		<i>Indice Kappa</i>	0,41	0,71	0,50	0,87
ago-23	Superficie (ha)	45,5	29,4	18,9	177,3	
	<i>Indice Kappa</i>	0,56	0,52	0,40	0,89	
dic-23	Superficie (ha)	26,6	22,0	5,9	112,9	
	<i>Indice Kappa</i>	0,46	0,62	0,64	0,82	
		Promedio Kappa	0,65	0,82	0,64	0,90
LANDSAT 8 - MR	ago-16	Superficie (ha)	62,6	114,7	58,2	269,9
		<i>Indice Kappa</i>	0,47	0,83	0,72	0,78
	dic-16	Superficie (ha)	55,0	110,3	41,6	233,8
		<i>Indice Kappa</i>	0,62	0,83	0,74	0,77
	ago-17	Superficie (ha)	38,2	104,6	263,8	393,3
		<i>Indice Kappa</i>	0,50	0,74	0,71	0,73
	dic-17	Superficie (ha)	39,3	75,3	103,7	189,7
		<i>Indice Kappa</i>	0,54	0,59	0,57	0,82
	ago-18	Superficie (ha)	63,7	78,4	88,6	296,1
		<i>Indice Kappa</i>	0,55	0,73	0,72	0,83
	dic-18	Superficie (ha)	44,4	81,7	17,4	255,3
		<i>Indice Kappa</i>	0,84	0,83	0,63	0,90
	ago-19	Superficie (ha)	53,8	85,1	40,9	234,3
		<i>Indice Kappa</i>	0,54	0,79	0,81	0,81
	dic-19	Superficie (ha)	57,7	107,8	49,9	248,2
		<i>Indice Kappa</i>	0,59	0,76	0,86	0,88
	ago-20	Superficie (ha)	60,0	105,4	18,7	331,6
		<i>Indice Kappa</i>	0,56	0,77	0,80	0,78
	dic-20	Superficie (ha)	36,1	83,0	8,5	225,5
		<i>Indice Kappa</i>	0,44	0,73	0,75	0,72
	ago-21	Superficie (ha)	40,0	36,0	15,6	216,1
		<i>Indice Kappa</i>	0,92	0,93	0,75	0,93
	dic-21	Superficie (ha)	35,5	33,4	24,0	235,1
		<i>Indice Kappa</i>	0,50	0,87	0,51	0,84

Tipo de imagen	Fecha monitoreo	Indicadores de monitoreo	Sistema Lagunar			
			La Punta - La Brava	Peine	Aguas de Quelana	Soncor
ago-22		Superficie (ha)	56,9	62,8	36,0	196,3
		Indice Kappa	0,59	0,83	0,52	0,94
dic-22		Superficie (ha)	26,9	27,7	17,8	184,8
		Indice Kappa	0,46	0,75	0,64	0,81
ago-23		Superficie (ha)	39,4	62,2	28,8	219,7
		Indice Kappa	0,41	0,75	0,45	0,94
dic-23		Superficie (ha)	28,8	26,9	13,0	119,1
		Indice Kappa	0,57	0,72	0,47	0,83
		Promedio Kappa	0,57	0,78	0,67	0,83

Fuente: Cedrem Consultores.

6.2 Análisis de comparación con registros históricos

Con el objetivo de fortalecer el análisis de la serie temporal que abarca las superficies de las lagunas, y teniendo en cuenta que durante la evaluación del proyecto se recopilieron datos que ahora forman parte de los registros históricos, en este octavo año del PSAH, se incorporan al análisis comparativo las superficies de las lagunas obtenidas a partir de imágenes Landsat desde 1972 hasta 2014, las cuales fueron presentadas durante la evaluación ambiental del proyecto.

Este enfoque tiene como objetivo principal explorar la evolución de las superficies lagunares a lo largo de los últimos ocho años de seguimiento semestral. Se busca determinar si estas variaciones forman parte de una variabilidad histórica tanto interanual como intranual. Este análisis se realiza considerando todos los factores que influyen en el funcionamiento de las lagunas en cada uno de los sistemas que conforman el área de estudio.

Es importante destacar que, además de las imágenes de alta resolución ya disponibles, se han incorporado imágenes de media resolución, provenientes de Landsat, para ampliar la perspectiva y enriquecer la comprensión de las dinámicas lagunares. El análisis de estas imágenes se integra en la presente discusión, contribuyendo así a una evaluación más completa y robusta de la evolución temporal de las superficies lagunares en el contexto del PSAH.

De esta forma, y desde el punto de vista de las imágenes Landsat, se cuenta con los siguientes conjuntos de información, cuyo alcance metodológico particular para el análisis de la superficie lagunar se describe brevemente a continuación:

1. Superficie mediante imágenes Landsat, 1972-2014, Adenda 5 RWL (2015).

La comparativa de los datos históricos desde 1972 a 2014, realizados durante la evaluación del proyecto (por el proveedor Argongra), estudió la evolución de las superficies lagunares en fechas representativas de la máxima y mínima extensión de las lagunas (invierno, verano; julio y diciembre, respectivamente). La metodología empleada establece un proceso de clasificación en función de un índice de agua (NDWI) y un proceso de depuración de las zonas obtenidas, mediante fotointerpretación. El resultado, son las superficies de los cuerpos de agua en metros cuadrados (m²) de los sistemas lagunares La Punta - La Brava, Peine, Soncor y Aguas de Quelana, permitiendo con ello la visualización de la evolución temporal

interanual de los sistemas estudiados (Apéndice L. Monitoreo de dinámica espacio-temporal de lagunas de la Zona Marginal del Salar de Atacama a través de imágenes satelitales LANDSAT, del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5).

2. Superficie mediante imágenes Landsat, 2016-2023, PSAH N°7 (serie complementaria Adenda 5 RWL (2015)).

Como complemento al análisis mencionado previamente, se incluye en este PSAH la serie temporal interanual correspondiente a los años 2016 a 2023. En este contexto, la metodología empleada se asemeja a la aplicada en la Adenda 5 RWL (2015). Se mantiene la referencia a los meses de máxima y mínima extensión lagunar (agosto y diciembre; inviernos y veranos), así como la estimación de la superficie lagunar a través del índice NDWI. No obstante, en esta ocasión, la estimación de la superficie lagunar se realiza mediante la creación de "máscaras de agua", es decir, una clasificación binaria que distingue entre valores de agua y no agua. El resultado final implica el análisis de la frecuencia de píxeles con valores positivos para agua ($NDWI > 0$, con un umbral establecido en 0) y su conversión a metros cuadrados (m^2). El valor de umbral se determinó a través de la observación de histogramas, el muestreo aleatorio de píxeles y la verificación de los umbrales utilizados en los monitoreos realizados entre 2016 y 2023. Este ejercicio permitió identificar que los píxeles con valores positivos reflejan la variación del índice NDWI en áreas ocupadas por la laguna, mientras que los valores negativos están mayormente asociados a otros tipos de cobertura.

Para todas las imágenes, la automatización del proceso de adquisición de los registros de NDWI se llevó a cabo mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE). Dentro de las etapas metodológicas y durante el preprocesamiento de cada imagen Landsat, se aplicó la corrección atmosférica de la reflectancia superficial. Este proceso elimina los efectos de la atmósfera en las mediciones de la luz reflejada por la superficie terrestre. Utilizando algoritmos especializados dentro de la plataforma GEE, se estimaron y ajustaron los efectos atmosféricos en las bandas espectrales, lo que permitió obtener valores de reflectancia más precisos y comparables entre diferentes imágenes y momentos de captura, de acuerdo con los valores de georreferenciación ya determinados.

3. Superficie mediante imágenes Landsat, 2016-2023, PSAH N°1 a N°8 (seguimiento RCA 21/2016)

En tercer lugar, se dispone de los resultados obtenidos de superficie lagunar mediante imágenes Landsat, los cuales han sido reportados en el marco de la RCA 21/2016 en los informes PSAH N°1 a N°8, y cuya metodología se explica en detalle en la sección 4.6 de este informe. Como puede desprenderse de dicha sección, la metodología considera un modelo de clasificación supervisada basado en una serie de parámetros espectrales, así como la validación en terreno/fotointerpretativa.

De esta forma, las superficies resultantes del PSAH entregan en mayor detalle las superficies de los cuerpos de agua, ya que cuentan con la combinación de cuatro índices espectrales y el trabajo en terreno y/o fotointerpretativo como base para la definición de áreas del recubrimiento agua. No obstante, estas pueden ser contrastadas referencialmente con la serie de tiempo de NDWI histórica (1972 – 2014) y su complemento (2016 – 2023), ya que estas establecen los rangos ocupados por cuerpos de agua en un contexto de larga data.

A pesar de que las áreas determinadas a partir de las imágenes Landsat involucran diversas metodologías utilizadas por distintos proveedores en su análisis para Albemarle en el pasado, estas diferencias no constituyen obstáculos para ampliar la perspectiva global sobre el comportamiento histórico de los sistemas lagunares. Las principales diferencias radican en la automatización del proceso y la validación fotointerpretativa como parte del cálculo de superficies.

En consecuencia, se sostiene que la información recopilada a partir de las imágenes Landsat ofrece una visión comprensiva del comportamiento histórico, y por ende, se analiza de manera conjunta. Este enfoque busca ampliar el espectro de variabilidad en las superficies lagunares en comparación con el análisis basado en imágenes de alta resolución (AR). Es importante señalar que las imágenes de alta resolución corresponden únicamente a 4 o 5 entre los años 2006 y 2015. Además, es pertinente destacar que estas imágenes se tomaron específicamente en marzo-abril para los sistemas Soncor, Peine y Aguas de Quelana, y entre enero y abril para La Punta La Brava.

En síntesis, de manera complementaria al análisis interanual realizado con imágenes Landsat, en la presente sección se realiza un análisis por sector de la variación intranual que toma como referencia la máxima cantidad de imágenes Landsat disponibles por año (ANEXO 9-25. Imágenes Landsat 2016 – 2023 – Análisis NDWI.) tomando en consideración aquellas que no presenten errores de origen o alta cobertura de nubes. La serie intranual permite visualizar los cambios entre periodos secos – lluviosos y su posible relación con variables ambientales (precipitación).

Finalmente, se presenta para cada sector un análisis de los resultados de superficie lagunar obtenidos en el marco de PSAH, utilizando imágenes de alta resolución, los cuales son contrastados referencialmente con datos de superficie lagunar determinados mediante imágenes de alta resolución en el Anexo 2 de la Adenda 5. Al respecto, es importante destacar que existen diferencias metodológicas en la determinación de ambas series de superficies (PSAH y Adenda 5), siendo los principales aspectos para considerar: diferentes tipos de imágenes de alta resolución, diferente metodología de clasificación supervisada, que la validación de terreno sólo se realiza en PSAH y temporalidad de las imágenes.

Considerando lo anterior, a continuación se describe brevemente para cada sistema lagunar, su funcionamiento y dinámica y su análisis considerando los registros históricos tanto interanuales como intranuales. Esta caracterización ha sido extraída del Apéndice I: Funcionamiento Lagunar, del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico, de la Adenda 5.

6.2.1 Sistema Lagunas La Punta - La Brava

- Funcionamiento del Sistema Lagunar

De acuerdo con la información histórica, el origen de la alimentación de las lagunas del Sistema La Punta - La Brava se sitúa en las zonas distales en el extremo sur de la cuenca a mayor altura, caracterizadas por aguas cloruradas sódicas, dulces a salobres y de composición isotópica ligera representativa de las aguas de recarga de la región, provenientes de los acuíferos de Monturaqui y Negrillar. Después de atravesar los acuíferos de Monturaqui y Negrillar, las aguas alcanzan la Zona Marginal de manera subterránea a través del Callejón de Tilopozo, no existiendo evidencias de un cauce activo que pudiese producir escorrentía superficial. En menor medida, también se producen entradas procedentes del Cordón de Lila en la zona de Tucúcaro.

Una vez que las aguas subterráneas llegan a la Zona Marginal, en las proximidades de las Vegas de Tilopozo, comienza a producirse evaporación directamente desde el terreno, comenzando la dinámica de disolución y precipitación de sales. La evolución de la composición química del agua de sur a norte indica que el enriquecimiento en sales se produce principalmente por fenómenos de disolución hasta llegar a las lagunas.

En la mayor parte de la Zona Marginal la evaporación es suficiente para mantener los niveles por debajo de la superficie. Sin embargo, en el área de las lagunas de este sistema, debido a la magnitud del flujo subterráneo procedente del sur y al encuentro con la salmuera, se genera una interfase salina que se dispone perpendicular al flujo por lo que el agua dulce-salobre se ve forzada a ascender, aflorando en superficie y dando origen a las lagunas. Ocasionalmente se produce un mayor caudal de entrada a las lagunas, después de períodos húmedos y coincidiendo con la época invernal, lo que produce flujos subsuperficiales hacia el Núcleo que alcanzan el límite con la costra de cloruros formando los “open pools”, donde se evapora y disuelve la costra, enriqueciéndose en sales disueltas que avanzan en el tiempo hacia el interior del Núcleo, convirtiéndose en salmuera.

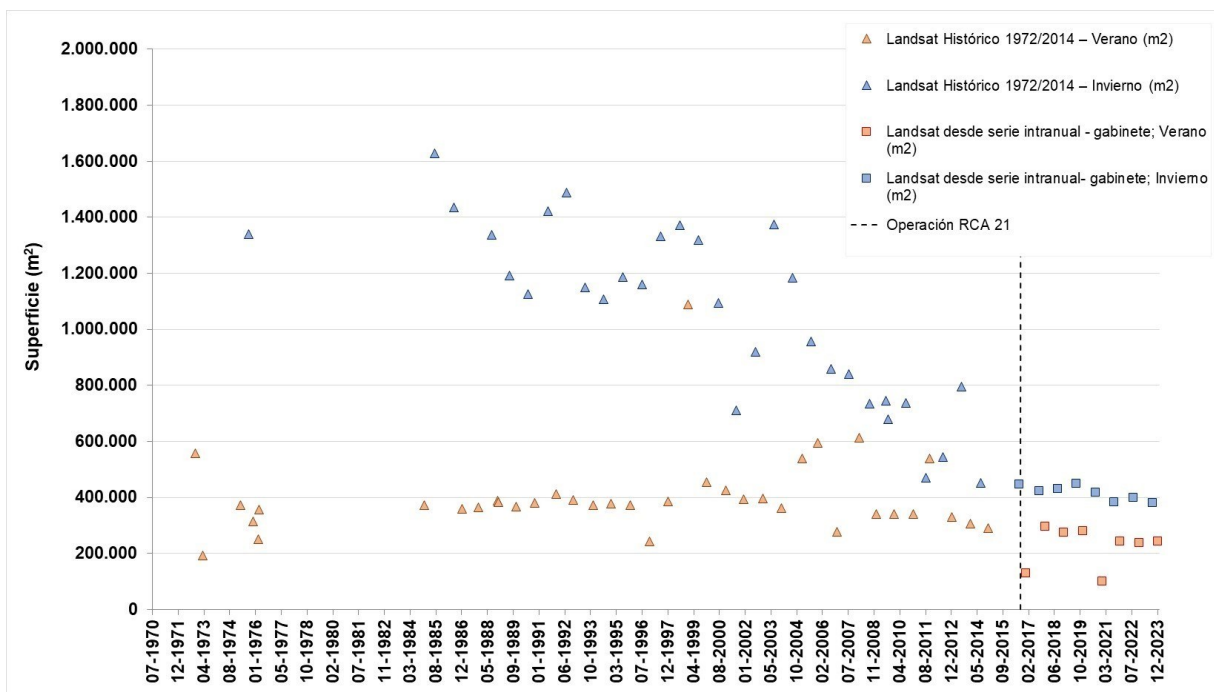
Finalmente, se indica que la superficie de las lagunas está condicionada principalmente por la variación estacional de la evaporación, y en menor medida por la ocurrencia de episodios de lluvia, que lo que provocan es un aumento general de los máximos y mínimos anuales en función de si se está en un período húmedo o uno seco.

- Evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

En la Figura N°6-1 se presenta la serie histórica entre los años 1972 - 2023 de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes satelitales Landsat, asociadas al índice NDWI. Esta serie permite analizar tendencias o evolución. En ella se puede observar que la máxima extensión de las lagunas se produce durante los meses de invierno (indicados en colores celestes); y con los registros más bajos en general en verano, dándose en marzo 1973 (192.469 m²), diciembre 2016 (130.500 m²) y diciembre 2020 (99.900 m²).

Se observa una tendencia histórica al descenso de las superficies asociadas a los inviernos (julio – agosto), y para las superficies registradas en los veranos (enero – febrero, diciembre) presentan una variabilidad en sus valores con cierta tendencia al descenso de los valores desde el verano del año 2000. En general, se observa que la diferencia entre superficies entre los inviernos y veranos se ha ido acortando desde el año 2008, mostrando un quiebre en la tendencia de las superficies de invierno, con un descenso en las coberturas estimadas en invierno 2021 a invierno 2023. Con respecto a los resultados de verano, se mantiene el verano de 2020 como la fecha con las menores superficies estimadas.

Figura N°6-1. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector La Punta - La Brava.



Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5 RWL (2015); y serie complementaria de las superficies mediante imágenes Landsat, 2016-2023.

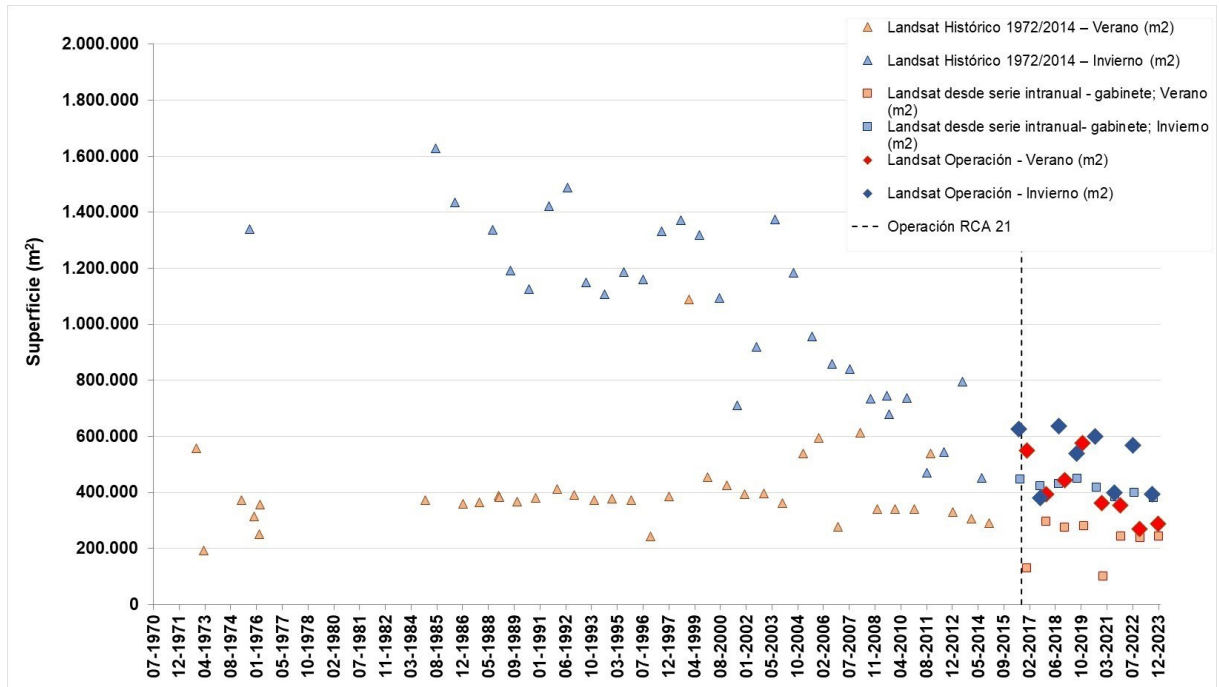
- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación con las superficies históricas (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

Los registros de superficies calculadas con Landsat observadas durante el monitoreo 2016 a 2023, como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI para el sector La Punta - La Brava y similares a los datos históricos, tanto en invierno y verano, considerando las superficies históricas de 1972 - 2014 y también las superficies Landsat de los años 2016 - 2023, como se observa en la Figura N°6-2.

Las principales diferencias entre la serie histórica NDWI - Landsat y los resultados de los reportes semestrales en el marco del PSAH, se pueden atribuir a varios factores, entre los que se cuentan el

robustecimiento de la metodología del procesamiento de las imágenes, el aporte de otros índices espectrales en la inclusión de zonas donde se presentan combinación de recubrimientos (ej. vegetación – agua), la validación en terreno (cuando se cuentan con las autorizaciones de acceso a las áreas de interés) y análisis visual (fotointerpretación en imagen de alta resolución y/o imagen dron UVA), cuya contribución corresponde a la depuración de los límites de los cuerpos de agua y la calibración del modelo de clasificación en función de lo observado.

Figura N°6-2. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector La Punta - La Brava.



Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5 RLW (2015); y serie complementaria de las superficies mediante imágenes Landsat, 2016-2023.

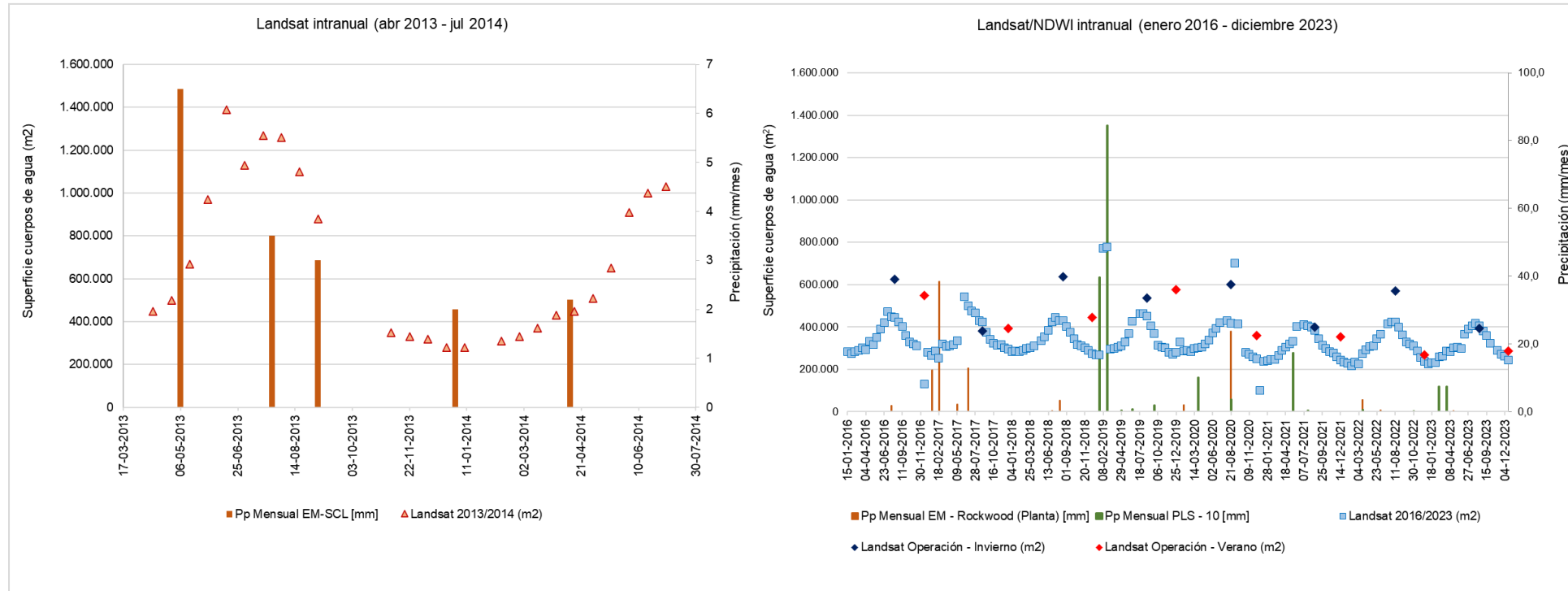
- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

En relación con las variaciones intranuales, la Figura N°6-3 muestra la fluctuación de las superficies lagunares, considerando el índice NDWI a partir de imágenes Landsat, tal como se presentó en el proceso de evaluación del proyecto, para los años 2013-2014. Para el presente análisis, se ha llevado a cabo un ejercicio similar para el periodo enero 2016 - diciembre 2023, estableciendo una relación con las precipitaciones registradas en la estación meteorológica de la Planta Salar Albemarle y los datos pluviométricos por sector. Desde este análisis intranual, se observa que durante los años 2013-2014, según la metodología utilizada en ese periodo, se registró un aumento en las superficies lagunares desde finales de mayo hasta agosto de 2013 (otoño – invierno), seguido de una disminución de los valores desde noviembre de 2013 hasta marzo de 2014 (primavera – verano). Posterior a esa fecha, las superficies experimentaron un incremento continuo hasta el siguiente invierno de 2014. Para la serie intranual 2013-2014, se evidenciaba cierta correspondencia o sincronía entre la superficie lagunar y las variaciones mensuales de precipitación a lo largo de ese año.

En el caso de los años 2016-2023 (Figura N°6-3, derecha), si bien se observa aumentos de superficie lagunar en invierno y descensos en período de verano, la amplitud de la variación es pequeña y no se observa una correspondencia directa entre las superficies observadas con la precipitación medida en la Estación Meteorológica Planta Salar, sino más bien se da una respuesta puntual e inmediata, como se verifica en el abrupto aumento de la superficie producto de la precipitación caída en invierno en agosto 2020 (23,8 mm estación planta; 3, 68 mm pluviómetro sector LPLB). Posterior a ello, la superficie lagunar retoma la tendencia previa al evento de lluvia. Los datos resultantes de los pluviómetros por sector muestran correspondencia en los eventos de precipitaciones de febrero 2019, agosto 2020 y mayo 2021 con las variaciones en las superficies lagunares, pero con la consiguiente baja abrupta a estos eventos. No se han registrado a la fecha eventos de precipitaciones que puedan generar un aporte a las superficies lagunares en seguimiento como lo observado en las fechas citadas.

De ambas series intranuales, se observa que las superficies más altas se tienen en los meses de invierno, entre julio hasta mediados de septiembre y los valores más bajos en primavera – verano, entre noviembre – marzo. De lo anterior, se puede señalar que la variación intranual de las superficies lagunares de La Punta-La Brava, tendría una relación más directa con la evapotranspiración y por ende con los niveles de aguas subsuperficiales, dejando la precipitación como un factor secundario dado que esta produce variaciones significativas de la superficie sólo para eventos de “alta precipitación” y de muy corto plazo. Este comportamiento es coherente con el observado en los niveles de pozos y barrenos del sector. De los registros de superficies calculadas semestrales del PSAH durante los monitoreos 2016 – 2022, Figura N°6-3, se observa que coinciden temporalmente con las variaciones en la serie de tiempo de NDWI intranual y el mayor aporte de precipitaciones (agosto 2020).

Figura N°6-3. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector La Punta - La Brava.



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, y a modo de complemento, la Figura N°6-4 siguiente presenta la serie Landsat histórica período 1985-2023, estimada por HIDROMAS, 2023 para Informe¹⁵ de Investigación N°3 Activación PAT Sector Alerta Acuífero de Albemarle (julio 2023), con el objetivo de poder estudiar la tendencia de largo plazo de los cuerpos lagunares a través del tiempo de mayor data. Los registros obtenidos fueron utilizando la misma técnica de clasificación de un índice de agua de diferencia normalizada (NDWI).

Al igual que para la serie 2016-2022, se utilizaron imágenes satelitales de libre disponibilidad LANDSAT y dado el período, se recopilaron imágenes de los satélites LANDSAT-5, 7 y 8 entre los años 1985 y 2021. Estas escenas contienen datos de reflectancia superficial (Surface Reflectance, Level-2), una resolución espacial de 30m de píxel, y se filtraron de acuerdo con su nubosidad (condición despejada) y su calidad radiométrica (no saturada).

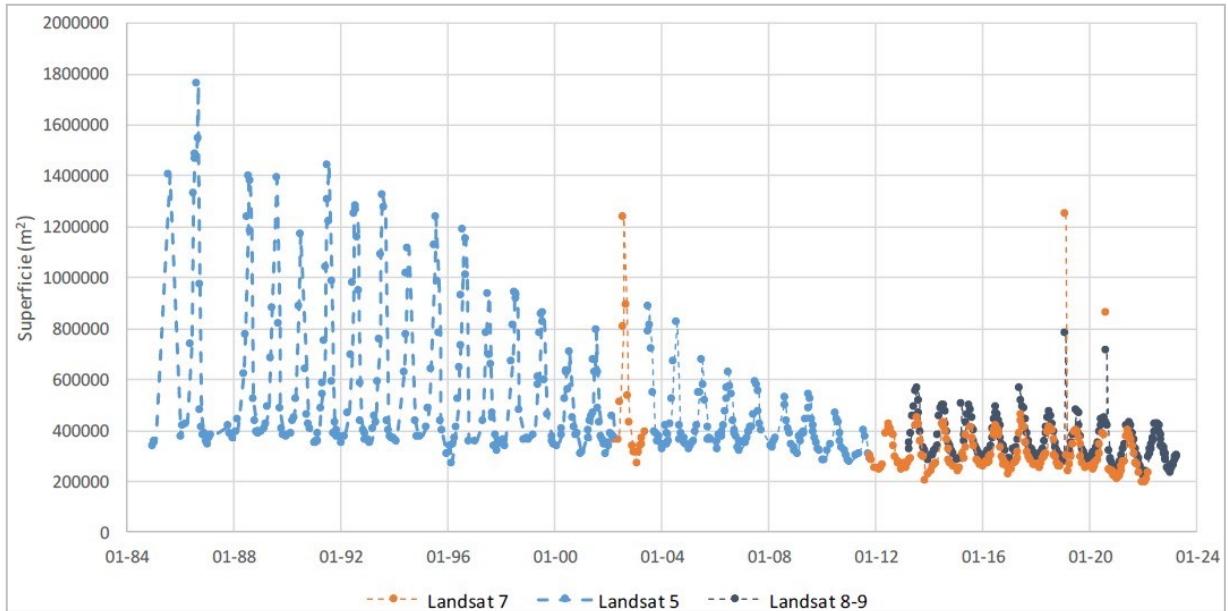
De la variación histórica, Figura N°6-4, se observan dos periodos de descenso en las áreas máximas anuales (áreas de invierno), previo al año 2012. El primer período desde el año 1994 a 2000 con una reducción de 1.400.000 m² a 705.000 m² aprox. y el segundo período de 2003 a 2012 con una reducción de 890.000 m² a 420.000 m² aprox. En el segundo periodo el área mínima de verano muestra además una reducción en el orden de 60.000 m².

Los dos periodos se encuentran interrumpidos por 2 años (2001 y 2002) donde se aumenta el tamaño máximo de las lagunas hasta 1.230.000 m² en julio de 2002. El aumento en el tamaño coincide con 81,7 mm de lluvia caída en marzo de 2001 y 20 mm en marzo de 2002 en la estación de EM – SCL. Finalmente, dada la escala del gráfico y la ventana temporal presentada histórica (1985-2021), en el periodo 2013 a 2021, considerando las variaciones previas del sistema lagunar La Punta - La Brava, se observa una cierta estabilidad en el tamaño máximo y mínimo del área de las lagunas, que es lo que se visualizaba antes de tener toda la serie, que podría estar asociado al efecto amortiguador de los eventos de precipitaciones que ha ocurrido con una frecuencia de 2 años durante los meses de verano de 2013, 2015, 2017, y 2019 (y también agosto de 2020) (Ver Figura N°6-3).

En resumen, considerando el periodo de 1985 a 2023 para el Sistema Lagunar La Punta y La Brava, se puede observar una tendencia a la baja histórica y una cierta estabilización pero que a escala más pequeña de tiempo sigue presentando disminución.

¹⁵ Informe Técnico de Investigación N°3 Activación Plan Alerta Temprana- Sector Alerta Acuífero (julio 2023)- Anexo D. Informe Teledetección Satelital Landsat Cuerpos de Agua Sectores La Punta La Brava y Peine. Albemarle – HIDROMAS. Junio 2023. Entregado a la SMA a través de Comprobante Cód. 1028011 del 31-07-2023, 2023 07 31 ALB-GMA-2023-SMA-040 Entrega Informe de Investigación.

Figura N°6-4. Variación histórica Sistema Lagunar La Punta-La Brava, Landsat NDWI (1985-2023).



Fuente: HIDROMAS, 2023 para Albemarle.

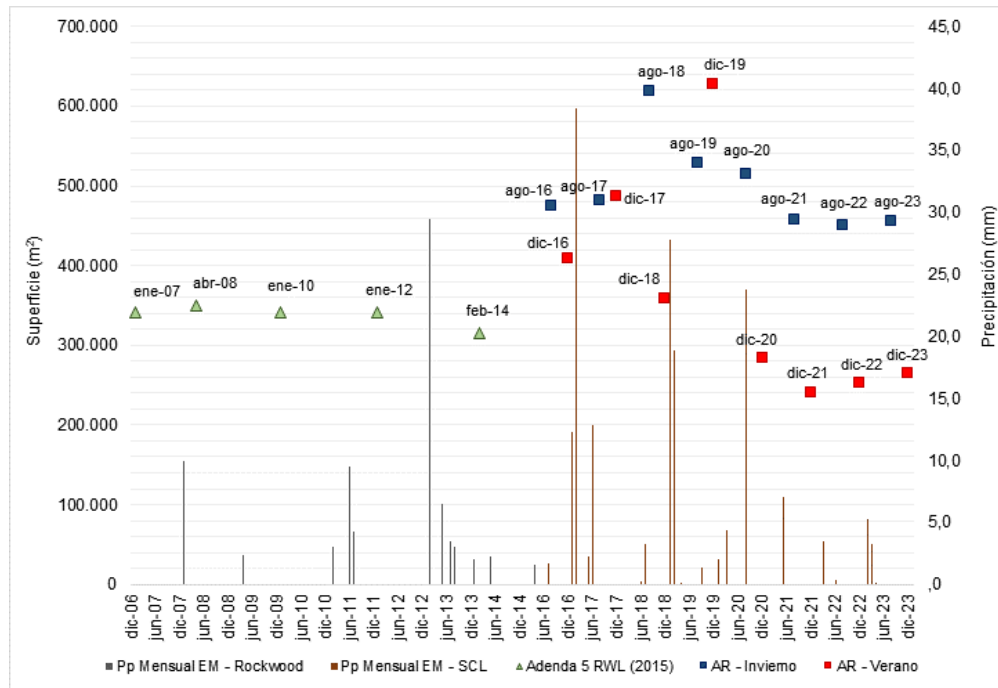
- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

Con respecto a la variación de las superficies lagunares semestrales del PSAH, en la Figura N°6-5 se presentan las imágenes de alta resolución para el sector La Punta - La Brava, junto a las superficies históricas AR presentadas en la Adenda 5 RWL (2015). Las superficies semestrales derivadas de imágenes de alta resolución del PSAH muestra variaciones con respecto las superficies lagunares de los registros históricos, especialmente durante los meses de verano. Hasta el verano de diciembre de 2019, estas superficies se encontraban por encima de los valores históricos. No obstante, a partir del verano de 2020, se ha observado que se sitúan por debajo de dichos valores. Para los meses de invierno no hay variaciones, con valores sobre los registros de la Adenda 5 RWL (2015). Es importante destacar que las superficies históricas en alta resolución han sido determinadas en meses distintos a los reportados semestralmente en el PSAH (agosto y diciembre), aspecto importante a considerar, dada la variabilidad intranual mostrada anteriormente.

De los aportes de precipitaciones en el periodo 2016 – 2023, los cuales se presentaron en general en el periodo de los meses de enero – marzo y mayo - julio; solo uno puede asociarse temporalmente al aumento de superficie lagunar, el cual corresponde a las lluvias de junio y julio de 2018 (3,5 mm acumulados). Por otra parte, las menores superficies registradas en el mes de diciembre de los años 2020 a 2023 no presentan lluvias asociadas. Sin embargo, de dicha información no se puede asegurar una relación entre el bajo aporte de precipitaciones y la baja en las superficies señaladas, ya que los años para los cuales se cuenta con áreas históricas de AR (Figura N°6-5) coinciden con el periodo de

menos lluvia y épocas de verano, pero también con el periodo de quiebre en la tendencia de las superficies lagunares (2008-2014).

Figura N°6-5. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar La Punta - La Brava.



Fuente: Elaboración Propia

6.2.2 Sistema Lagunas Peine

- Funcionamiento del Sistema Lagunar

El Modelo conceptual del funcionamiento del Sistema Peine indica que las aguas de las lagunas son alimentadas por agua subterránea procedente del sureste. En la zona donde el nivel freático del acuífero de agua salobre intercepta la superficie del terreno, se sitúan los puntos de surgencia que se disponen a lo largo de un canal situado a unos 2 km al sur de la Laguna Salada. Una vez en superficie, el agua comienza a sufrir proceso de evaporación con más intensidad, fluyendo a través de la Laguna Salada luego por la Laguna Saladita y finalmente hacia la Laguna Interna, a través de una serie de canales de ancho variable y muy poco espesor de lámina de agua. Por último, el agua de la Laguna Interna acaba adentrándose en el Núcleo de salmuera de manera superficial, disolviendo la costra de cloruros y enriqueciéndose paulatinamente en sales disueltas, hasta que finalmente, ya convertida en salmuera, se incorpora al Núcleo.

Junto con lo anterior, además se observa que en los meses estivales se produce precipitación de sales por sobresaturación debida a evaporación, mientras que en los meses de invierno y primavera es cuando mayor es el caudal hacia la Laguna Interna, produciéndose disolución.

Las columnas litológicas obtenidas en las perforaciones realizadas en la zona (Adenda 5 RWL (2015)), han mostrado la existencia de sedimentos finos laminados; principalmente limos carbonatados y materia orgánica, cuyo origen es la deposición en el fondo de antiguas lagunas. Este tipo de sedimentos presenta valores bajos de conductividad hidráulica vertical por lo que la conexión entre el acuífero y el fondo de las lagunas no es buena. El aporte principal es por tanto superficial, ya sea a través de los canales existentes, o bien a través de las orillas de las lagunas.

Para las lagunas de Peine, del modelo conceptual se tiene que existiría una cierta correlación entre el área ocupada por las lagunas, y la precipitación registrada. No se observa una variación estacional de la superficie lagunar por influencia de la evaporación, si fuese así se observaría un aumento de superficie en julio de 2014 (Figura N°6-6) lo cual se corrobora con el análisis intranual año 2016-2023 de la misma Figura.

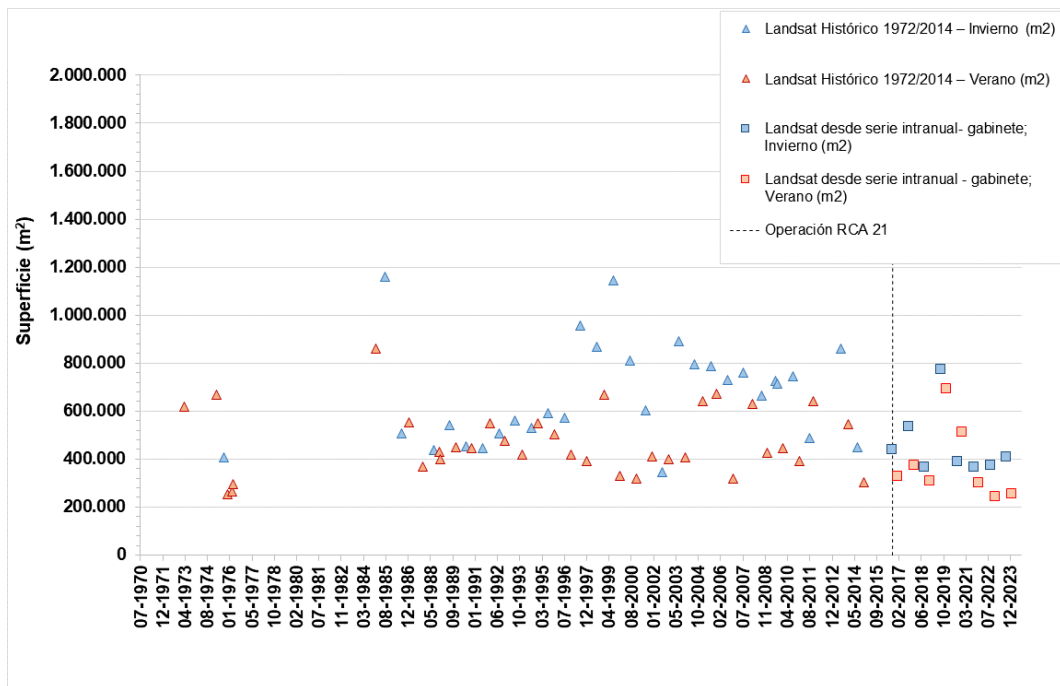
De la línea base y funcionamiento de las lagunas presentado en la Adenda 5 RWL (2015), se tiene de los datos y análisis químicos e isotópicos que, *“las lagunas Saladita e Interna presentan una estrecha relación con el régimen de precipitaciones de la zona, enriqueciéndose isotópicamente en verano y empobreciéndose en invierno. Mientras que el contenido isotópico y químico de la Laguna Salada tiende a ser menos evidente a los cambios de temperatura y de evaporación”*. La explicación para esto se encontraría dada su cercanía a la fuente que da origen a estas lagunas.

- Evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

En la Figura N°6-6, se presenta la serie histórica (1972 – 2023) de imágenes de mediana resolución. Durante los inviernos hasta 2014, se observa una variabilidad marcada, con cifras máximas alcanzadas en 1985, registrando una extensión de 1.158.818 m², y cifras mínimas en 1975, con tan solo 405.419 m². Este periodo invernal muestra fluctuaciones notables, destacando años como 1997, con una cifra máxima de 956.845 m².

En contraste, los veranos hasta 2014 revelan una dinámica estacional diferente, con patrones de crecimiento y decrecimiento en las extensiones lagunares. Sin embargo, la serie temporal a partir de 2015 hasta 2023 muestra una tendencia a la baja en ambas estaciones, con una cifra máxima importante en el invierno de 2019, alcanzando 774.900 m². La comparación entre inviernos y veranos posteriores a 2014 revela, en su mayoría, valores inferiores en ambas estaciones (m²) (ver Figura N°6-6).

Figura N°6-6. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine.



Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

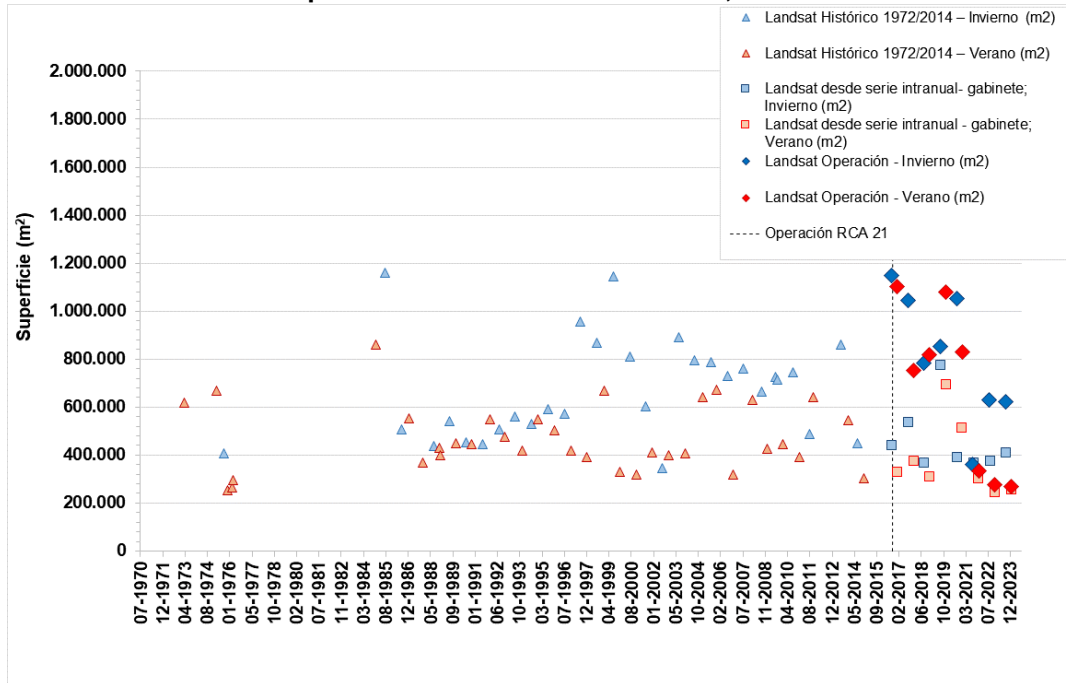
- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación con las superficies históricas (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

En la Figura N°6-7 se presentan las superficies lagunares determinadas en el PSAH entre los años 2016-2023, con relación a las superficies históricas determinadas mediante NDWI – Landsat (1972-2023). Los registros de superficies calculadas con Landsat, reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2023 como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según la variación del índice NDWI, tanto en invierno como en verano, y para las series 1972 – 2014 y 2016 - 2023. Para los años 2016, 2017 y 2020 las superficies de invierno reportadas se encuentran en el rango de las superficies máximas, así como los registros de verano de 2016 y 2019; mientras que las mínimas se presentan en los registros de invierno y verano de 2021 y veranos de 2022 y 2023, siendo los veranos los que presentan un mayor descenso.

Las diferencias entre la serie histórica NDWI - Landsat y los resultados derivados de los informes semestrales dentro del marco del PSAH encuentran su origen en diversos factores. Entre estos, se destaca la robustez adquirida en la metodología de procesamiento de imágenes. La inclusión de otros índices espectrales desempeña un papel fundamental, especialmente al considerar áreas con combinaciones variadas de recubrimientos, como la intersección entre vegetación y agua. La validación en terreno, realizada en conformidad con las autorizaciones para acceder a áreas de interés, y el análisis visual, que abarca la fotointerpretación de imágenes de alta resolución y/o imágenes capturadas por drones UVA, contribuyen significativamente. Estas contribuciones se traducen en la depuración precisa

de los límites de los cuerpos de agua y la calibración efectiva del modelo de clasificación en función de las observaciones realizadas en el terreno.

Figura N°6-7. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Peine.



Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

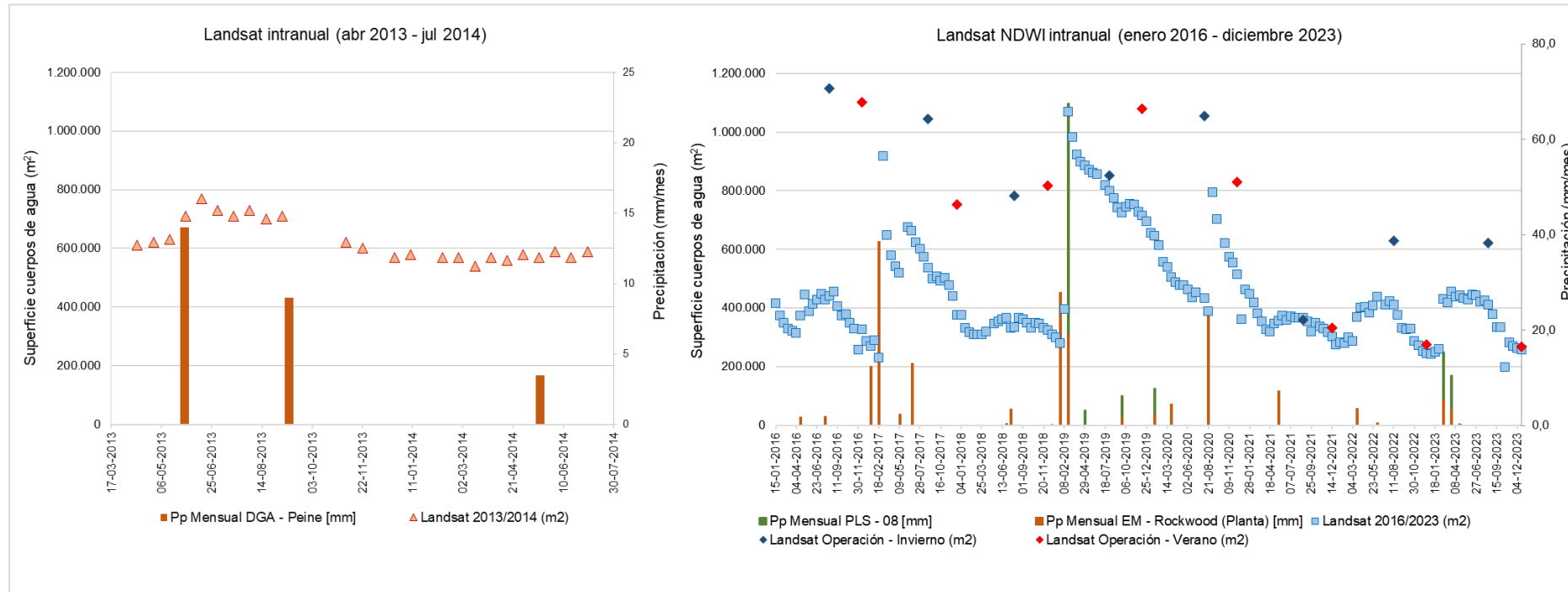
- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

Respecto a las variaciones intranuales para el sector Peine, en la Figura N°6-8 se observa en el gráfico (lado izquierdo) la variación de las superficies lagunares mediante el índice NDWI - Landsat, durante los años 2013 – 2014 y en el gráfico de la derecha, con un análisis similar para años 2016 – 2023 y junto con ello las precipitaciones de la estación ubicada en Planta Salar Albemarle y pluviométricos sector Peine. De este análisis intranual se puede apreciar que para los años 2013-2014 existe menor variabilidad de las áreas lagunares (200.000 m² aprox.), a diferencia de los años 2016-2022 con un rango de variabilidad que va desde 1.000.000 m² hasta 230.000 m² aprox.

En la Figura N°6-8 se observa un ligero aumento en las superficies lagunares de Peine de mayo a septiembre de 2013, manteniéndose estables de noviembre 2013 a julio 2014. Para el periodo de 2016-2023, la serie Landsat/NDWI muestra un aumento significativo entre febrero 2019 y enero 2020, seguido por una disminución hasta agosto 2020. Se destaca un fuerte incremento en septiembre 2020, seguido de fluctuaciones que mantienen las superficies alrededor de 340.000 m² desde marzo 2021 hasta finales de 2021. Estas variaciones se relacionan con eventos de precipitación, como se refleja con los datos pluviométricos importantes de febrero 2019, agosto 2020 y febrero 2023. Desde septiembre 2020 hasta la fecha, no se han reportado aumentos significativos, siguiendo un ciclo observado desde abril de 2021.

En relación con las fluctuaciones en las superficies de lagunas según el índice Landsat/NDWI entre 2016 y 2023, así como los registros calculados como parte del PSAH, se destaca que estos últimos se sitúan dentro de los valores máximos y mínimos registrados hasta diciembre de 2023. No obstante, es relevante señalar que los registros de invierno y verano de 2021, así como los registros de verano 2022 y verano de 2023, se encuentran en el rango mínimo de las superficies calculadas según el índice NDWI, las superficies mínimas observadas en los veranos de 2016 y 2017 son comparables en magnitud a la estimada para el verano de 2022 y 2023.

Figura N°6-8. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine.



Fuente: Elaboración propia.

Sin perjuicio de lo anterior, y tal como se han estudiado las lagunas La Punta y La Brava, con el objetivo de analizar la evolución histórica que ha tenido el sistema Peine, es que durante el año 2023 Albemarle encomendó el estudio de las superficies lagunares de este sistema desde una ventana temporal más amplia, con el objetivo de obtener la tendencia de largo plazo de los cuerpos lagunares en un análisis de larga data. La Figura N°6-9 presenta esta serie Landsat histórica período 1985-2023, estimada para el Informe¹⁶ de Investigación N°3 Activación PAT Sector Alerta Acuífero de Albemarle (julio 2023). Los registros se obtuvieron utilizando la misma técnica de clasificación de un índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), y considerando todo el sistema Peine en su conjunto, es decir, lagunas Salada, Saladita e Interna.

Al igual que para la serie 2016-2021, se utilizaron imágenes satelitales de libre disponibilidad LANDSAT y dado el período, se recopilaron imágenes de los satélites LANDSAT-5, 7 y 8 entre los años 1985 y 2023. Estas escenas contienen datos de reflectancia superficial (*Surface Reflectance, Level-2*), una resolución espacial de 30m de píxel, y se filtraron de acuerdo con su nubosidad (condición despejada) y su calidad radiométrica (no saturada).

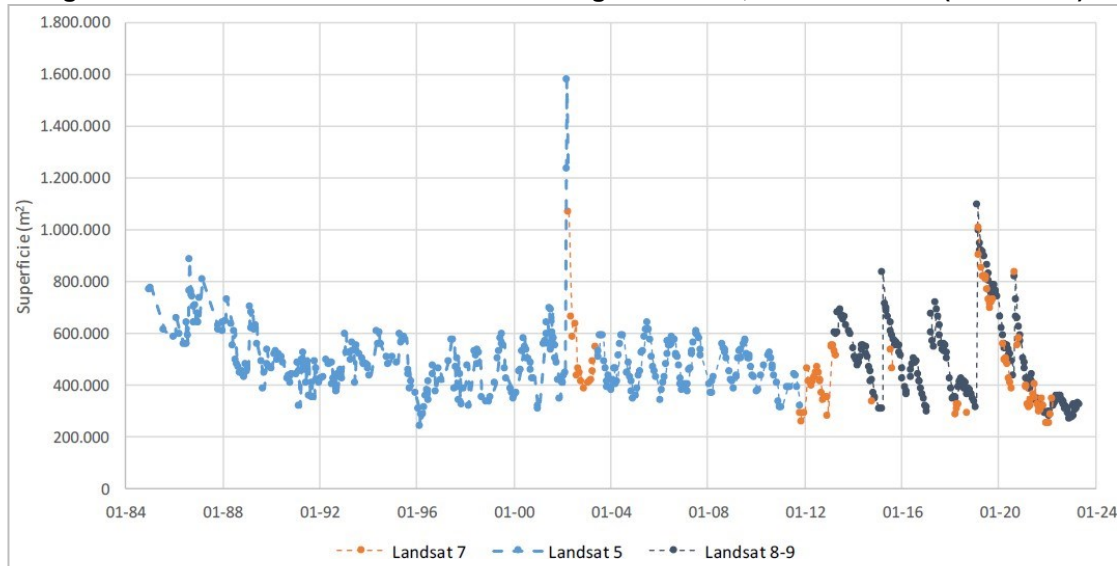
Analizando la variación histórica de las superficies lagunares, a través de las imágenes Landsat NDWI (1985-2023), Figura N°6-9, en general se observan tres periodos. El primer período entre 1985 a 1996, marcado por descensos y ascensos tanto de las superficies mínimas de verano como de las de invierno, llegando a un mínimo de casi 200.000 m² en el año 1996. El segundo período entre 1996 a 2013, caracterizado por una variabilidad estacional más o menos en rangos estables, entre 400.000 m² a 600.000 m² aproximadamente, con la excepción de una subida abrupta en marzo del año 2002. Finalmente, un tercer período desde el 2013, en el cual la laguna cambia su comportamiento, presentando una variación no estacional y con aumentos abruptos de superficies en promedio cada 2 años aprox. Estos aumentos o peaks de áreas, han coincidido con las precipitaciones del último período (Ver Figura N°6-8).

Como se puede observar, los valores registrados durante el seguimiento ambiental y en particular el año 2023, se encontraría dentro de los rangos de variabilidad histórica del sistema Peine, el que ha fluctuado de manera dinámica y variable a través del tiempo. Las variaciones de las superficies lagunares del último período, podrían estar condicionadas a la morfología de las tres lagunas que conforman el sistema Peine, en especial de la laguna Interna, dados sus desbordes y cambios en sus flujos, así como por las condiciones climatológicas del lugar.

En resumen, considerando el periodo de 1985 a 2023 para el Sistema Lagunar Peine, se puede observar una variabilidad histórica y una cierta dependencia de las condiciones locales físicas e hidrológicas, y que en el último período 2013- 2023 se ve relacionado con el aporte de precipitaciones.

¹⁶ Informe Técnico de Investigación N°3 Activación Plan Alerta Temprana- Sector Alerta Acuífero (julio 2023)- Anexo D. Informe Teledetección Satelital Landsat Cuerpos de Agua Sectores La Punta La Brava y Peine. Albemarle – HIDROMAS . Junio 2023. Entregado a la SMA a través de Comprobante Cód. 1028011 del 31-07-2023, 2023 07 31 ALB-GMA-2023-SMA-040 Entrega Informe de Investigación.

Figura N°6-9. Variación histórica Sistema Lagunar Peine, Landsat NDWI (1985-2023)



Fuente: HIDROMAS, 2023 para Albemarle.

- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

En relación con las variaciones de las superficies semestrales del PSAH a través de imágenes de alta resolución para el sector Peine (ver Figura N°6-10), se evidencia una cierta variabilidad estacional manifestada por la diferencia entre las áreas de invierno y verano. Esta variación es apreciable en la mayoría de los años, a excepción de los períodos 2017 y 2018. Estos hallazgos, respaldados por los resultados obtenidos a partir de imágenes Landsat, revalidan el modelo conceptual formulado durante la evaluación del proyecto. Según dicho modelo, en general, no se observa una variación estacional significativa en la superficie lagunar de Peine debido a la influencia de la evaporación.

En relación con las magnitudes de las superficies históricas en AR (Adenda 5 RWL, 2015), se observa que las superficies semestrales del PSAH, desde el invierno de 2021 hasta la fecha, se sitúan por debajo del mínimo histórico en AR, de 489,000 m². Es importante resaltar en esta comparativa que las superficies históricas en AR han sido determinadas en meses diferentes a los informados semestralmente en el PSAH, específicamente en agosto y diciembre. Este aspecto es significativo considerando la variabilidad intranual previamente demostrada, ya que las condiciones pueden diferir notablemente entre los meses mencionados.

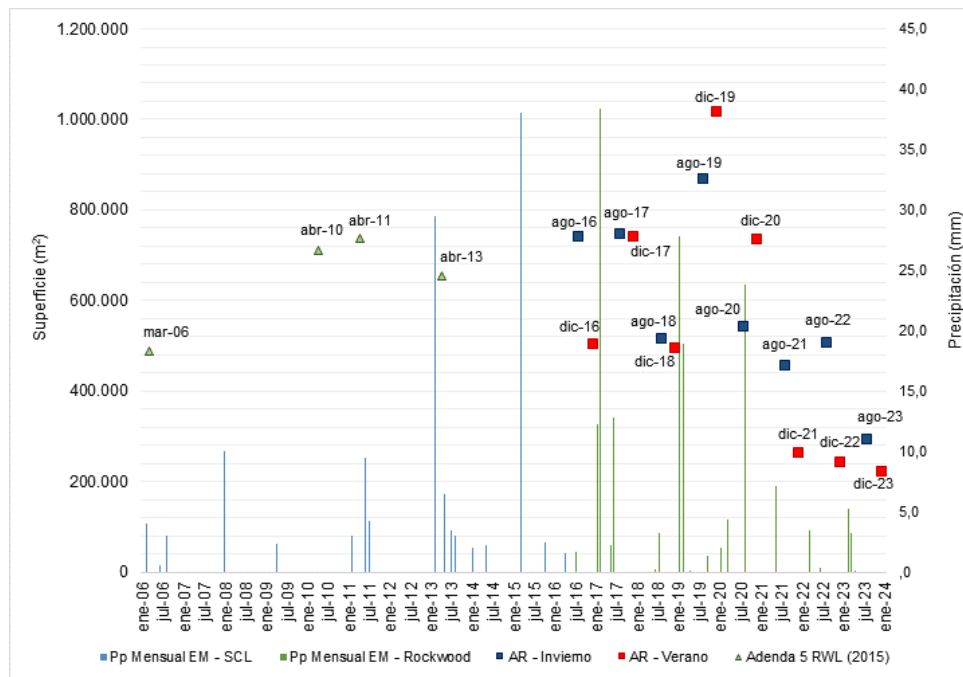
Con respecto a las precipitaciones para el sector¹⁷, y considerando las precipitaciones registradas por estación Peine y en los últimos años la estación de Albemarle, observando la Figura N°6-10, se desprende que las precipitaciones de mayor aporte no siempre se relacionan temporalmente a

¹⁷ La recopilación de información de precipitaciones anuales de la estación meteorológica DGA – Peine, actualizada en línea hasta mayo de 2020, posterior a esta fecha no existen datos en DGA, encontrándose en estado de suspensión (diciembre 2023); por lo tanto, se agregan datos de las estaciones meteorológicas Planta Albemarle para contextualización.

superficies máximas o variaciones significativas en los cuerpos de agua del sector Peine, por lo que no puede relacionarse directamente el aporte de precipitaciones a la superficie lagunar.

Las mediciones de precipitaciones registradas por la estación meteorológica en la Planta Albemarle revelan ciertos patrones durante varios periodos. En los meses de enero a junio de 2017, se observa un aumento con un total acumulado de 65,7 mm para ese periodo (en contraste, la estación DGA - Peine reporta 45 mm acumulados en febrero de 2017). A pesar de este incremento, no se evidencia un efecto directo en las superficies de agua para los meses de agosto y diciembre de 2017, ya que estas se mantienen dentro del rango estimado para el sector. En el caso de las precipitaciones de enero a abril de 2019, con un acumulado de 46,8 mm (5,5 mm según DGA - Peine), podría existir una relación con el aumento de las superficies según los informes semestrales de agosto y diciembre de 2019. Sin embargo, este volumen es menor en comparación con otras cifras reportadas que no han generado un aumento en las superficies lagunares del sector. En agosto de 2020, con precipitaciones de 23,8 mm, se podría inferir un aumento en las superficies informadas en diciembre de 2020. En el periodo de enero a diciembre de 2021, solo se registran precipitaciones en mayo de 2021 (7,1 mm según datos de la Planta Salar), lo que podría indicar un leve aumento en las superficies para agosto de 2021. Para el año 2022, no se reportan precipitaciones, y en el periodo de 2023, las precipitaciones se registran en febrero y marzo, con un acumulado de 8,5 mm, sin generar variaciones significativas en las superficies de las lagunas. Estos hallazgos revelan respuestas diversas y variaciones puntuales en las superficies, en algunos casos asociadas a eventos de precipitaciones, pero no de manera consistente. Esto sugiere una relación entre ambas variables, aunque se reconoce la influencia de otros factores como la evapotranspiración y los niveles subsuperficiales.

Figura N°6-10. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Peine.



Fuente: Elaboración Propia

6.2.3 Sistema Aguas de Quelana

- Funcionamiento del Sistema Lagunar

Este sistema lagunar se sitúa sobre la Zona Marginal en el este del Salar de Atacama, y está conformado por un conjunto de lagunas de poca profundidad, situadas al pie de los depósitos aluviales que conectan con las Quebradas de Camar y El Toro. Su disposición es norte-sur, en paralelo al límite entre el Núcleo y la Zona Marginal, y también en paralelo a la posición de la interfase salina en esta zona.

De los datos históricos de superficie lagunar (Landsat 1972-2014) presentados en Adenda 5 RWL, “el complejo de Aguas de Quelana es el único que se ha llegado a observar prácticamente seco, sin apenas lámina libre de agua detectable por satélite con la resolución que permite el sensor montado sobre los satélites LANDSAT” [Ref.: línea de base Apéndice L: Monitoreo satelital Lagunas].

En este sistema las características de los cuerpos de agua provocan que el error al determinar la superficie inundada por esta metodología sea alto. Esto lleva a una subestimación de la superficie, especialmente en las mediciones de verano cuando los espejos de agua son más pequeños y dispersos. En este sistema presenta una fuerte estacionalidad con superficies en invierno significativamente mayores a las registradas en verano.

La entrada de agua a las lagunas del Sistema Aguas de Quelana, se produce a través de afloramientos situados al Este de estas, en cuyos alrededores se desarrolla vegetación. En este sistema no se aprecia la presencia de canales que alimenten los cuerpos de agua, a diferencia de lo que sucede en los sistemas Peine y Soncor. Esto estaría indicando que las surgencias de agua subterránea se producen en las mismas lagunas o muy cerca de ellas. El flujo subterráneo que llega al sistema lagunar proviene de los acuíferos aluviales del este, que son alimentados por las quebradas de Camar, Cucala y El Toro. Los mayores aportes de agua a las lagunas se producen después de los períodos húmedos, sobre un cierto umbral de precipitaciones, como por ejemplo los años 2012 o 2017, que se traducen en un aumento de corto plazo de la superficie inundada de las lagunas.

El agua en las lagunas está sometida a procesos de evaporación. A la vista de las imágenes satelitales y de la geología descrita por Moraga *et al* (1974), se deduce que, durante estos eventos de precipitación, una parte del agua, que no puede evaporarse, discurre superficialmente a través de canales hacia el límite con la costra de cloruros del Núcleo, donde finalmente se incorpora al mismo ya convertida en salmuera. El hecho de que no se observen los denominados “open pools”, en el límite entre la costra de cloruros y la Zona Marginal, indica que estos flujos se producen únicamente tras eventos de gran precipitación.

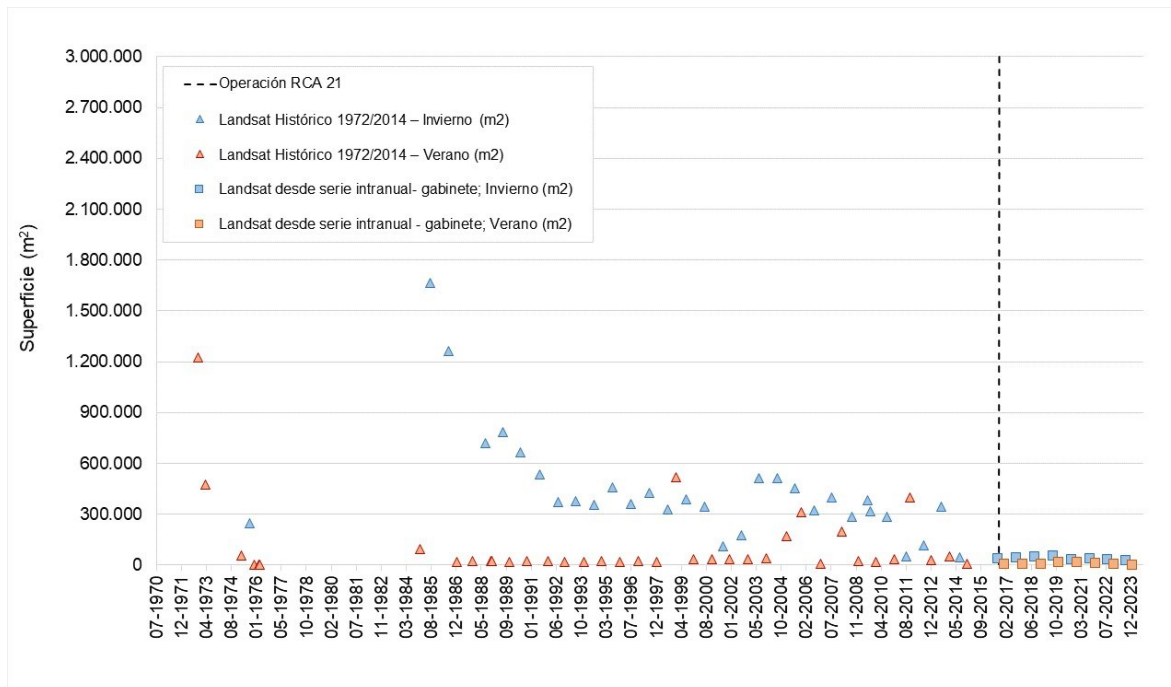
- Evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

En la Figura N°6-11 se presenta la serie histórica (1972 – 2023) de las superficies lagunares del sector Aguas de Quelana, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat asociadas al índice NDWI. La serie temporal de datos, que abarca desde 1972 hasta 2023, se muestra la variabilidad en las superficies lagunares del sector Aguas de Quelana.

La serie temporal de superficies lagunares en el sector Aguas de Quelana, registrada desde octubre de 1972 hasta diciembre de 2023, muestra patrones significativos en la variabilidad de estas extensiones a lo largo de los años. Durante los inviernos, se observan superficies con cifras máximas importantes en 1985 y 1986, alcanzando 1.665.409 m² y 1.263.722 m², respectivamente. Sin embargo, algunos inviernos presentan extensiones mínimas, como en 2020 – 2021 y 2022 con extensiones promedios dentro de los 35.000 m². En contraste, los veranos muestran una dinámica estacional diferente, con una extensión máxima excepcional en 1972 de 1.224.432 m², pero en general los promedios en verano alcanzan los 60.000 m². Las menores extensiones se observan en los meses de diciembre de 2014, donde el promedio en verano alcanza los 10.000 m².

En general, la serie de datos muestra que la máxima extensión de las lagunas se produce principalmente durante los meses de invierno, indicados en colores celestes en la gráfica, con una tendencia a la baja de las superficies lagunares mínimas en los registros de Landsat/NDWI, para ambas temporadas desde 2014.

Figura N°6-11. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Aguas de Quelana.



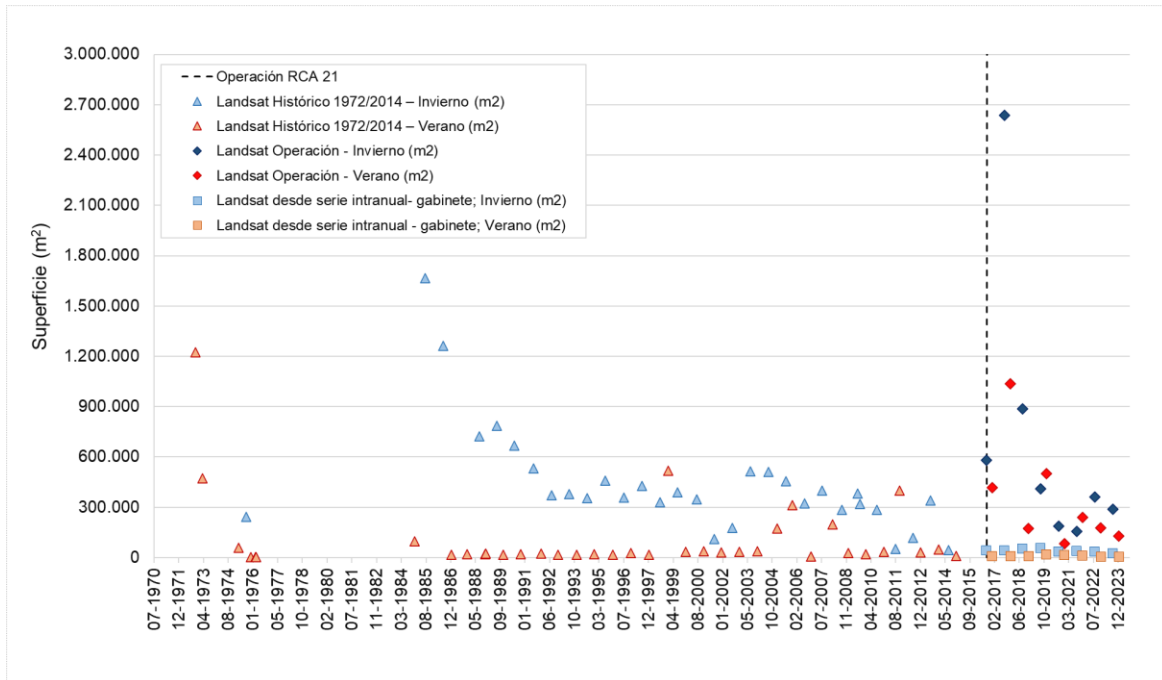
Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación con las superficies históricas (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

Los registros de superficies calculadas con Landsat, reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2023 como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI, tanto en invierno como en verano (Figura N°6-12).

Las diferencias significativas entre la serie histórica NDWI - Landsat y los resultados de los reportes semestrales dentro del marco del PSAH se atribuyen al fortalecimiento de la metodología de procesamiento de imágenes. Este fortalecimiento incluye la incorporación de otros índices espectrales para abordar zonas con combinaciones de recubrimientos, como por ejemplo, áreas con vegetación y agua. Además, se destaca la importancia de la validación en terreno y el análisis visual fotointerpretativo en este proceso. Estas etapas contribuyen de manera significativa a depurar los límites de los cuerpos de agua y a calibrar el modelo de clasificación en función de las observaciones realizadas en campo. En el contexto específico de Aguas de Quelana, la metodología aplicada en el marco del PSAH posibilita la inclusión de áreas de vegetación inundada en la superficie total de ocupación de las lagunas. Estas áreas son identificadas a través de índices como el NDVI y la Banda NIR, lo que explica la detección de regiones de transición que no son captadas por la metodología NDWI-Landsat. Estas diferencias en la detección de superficies se traducen en discrepancias en las áreas calculadas por ambos métodos.

Figura N°6-12. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Aguas de Quelana.



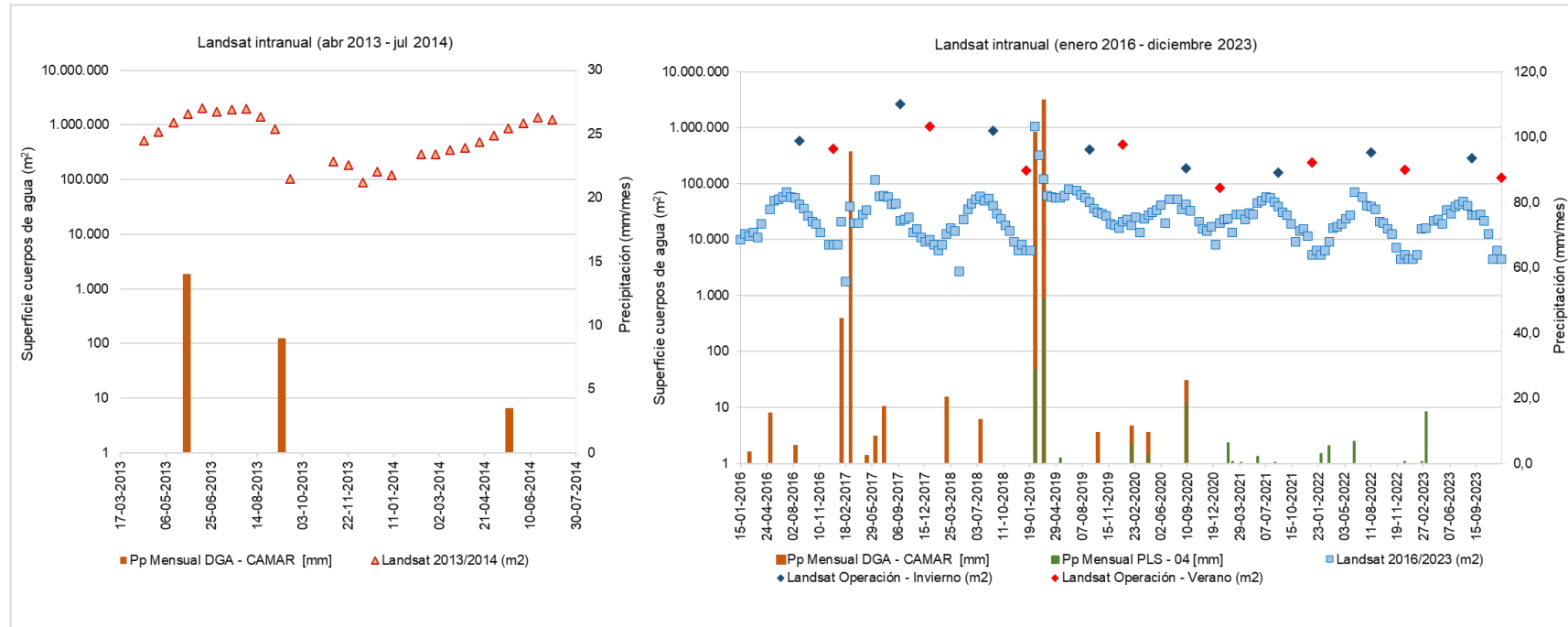
Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

Con respecto a las variaciones intranuales para el sector Aguas de Quelana, en la Figura N°6-13 se presenta la variación de las superficies lagunares mediante el índice NDWI - Landsat, durante los años 2013 – 2014, datos presentados en proceso de evaluación del proyecto, y las estimadas para el período 2016 – 2023, junto a los registros de precipitaciones en el sector. De la variación intranual se puede apreciar que para los años 2013-2014 existe aumento de las superficies para la época de invierno, esto es desde fines de mayo de 2013 hasta agosto de 2013, y disminuciones de las superficies para la época de verano, con las menores superficies registradas entre septiembre de 2013 a enero de 2014, siendo este último registro donde no se observan cuerpos de agua. Por otro lado, los registros en la serie 2016 – 2023, muestran áreas mucho menores que las 2013-2014, pero también siguen mostrando un aumento de las superficies en inviernos (aproximadamente entre mayo y septiembre) y descensos en época de primavera-verano (aproximadamente entre octubre y fines de enero), siendo los valores más bajo del periodo 2016 – 2023 los registrados en febrero 2017, abril 2018, diciembre 2022, enero 2023, noviembre – diciembre 2023 donde se observan superficies que bordean o están bajo los 5.000 m².

Del análisis intranual y en relación con las precipitaciones, tanto el período 2013-2014 como el 2016-2022, se observan aumentos y descensos de superficies de lagunas que no se relacionan directamente con los eventos de precipitación, lo que indicaría y reafirmaría el funcionamiento del modelo conceptual para este sistema, con que el agua en las lagunas está sometida a procesos de evaporación, y este sería el factor preponderante. Solo se observa correspondencia entre el aumento de precipitaciones y de superficies en los registros de febrero 2019, donde ambas variables presentan aumentos significativos.

Figura N°6-13. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Aguas de Quelana.



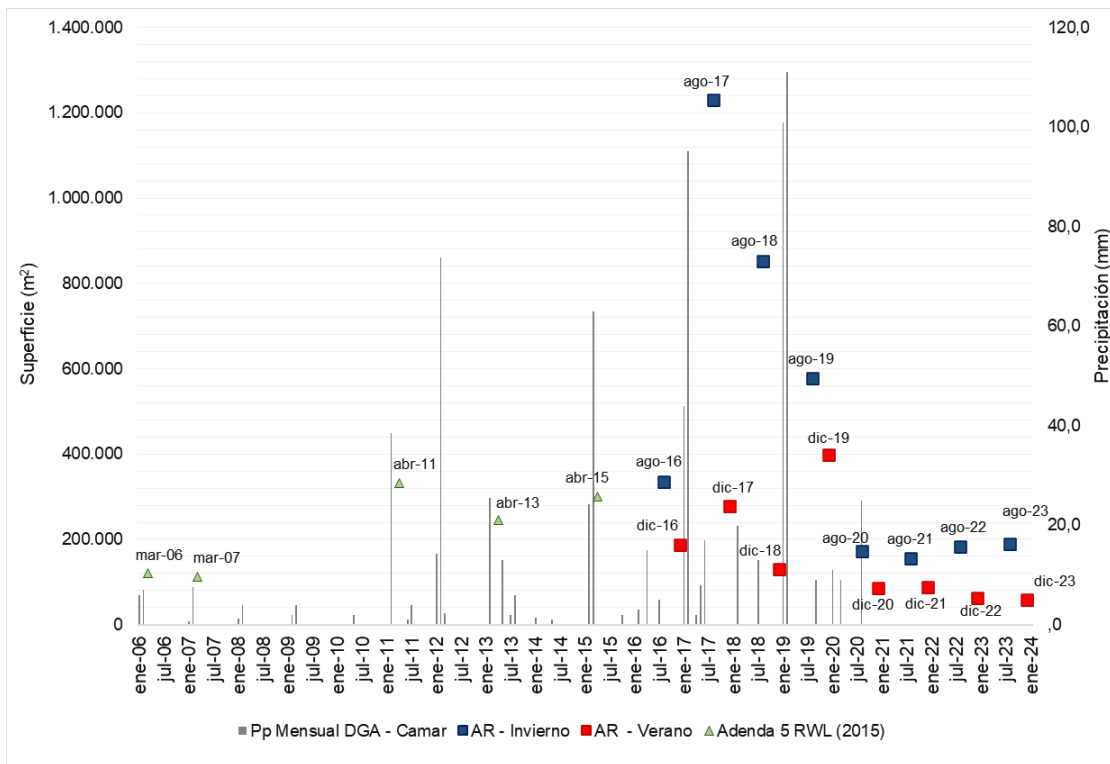
Fuente: Elaboración propia.

- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

En relación con la variación de las superficies semestrales del PSAH en el sector Aguas de Quelana, analizadas mediante imágenes de alta resolución (ver Figura N°6-14), se destaca que estas superan el mínimo histórico para comparaciones con registros de invierno, pero se sitúan por debajo en comparación con los registros de verano. Al respecto, es importante señalar que las superficies históricas en alta resolución fueron determinadas en meses diferentes (marzo) respecto a los informes semestrales del PSAH (agosto y diciembre), introduciendo una consideración importante dada la variabilidad intranual previamente mostrada.

En cuanto a las precipitaciones en el sector durante el periodo semestral de 2016 a 2022, se destacan eventos notables, como aquellos ocurridos en agosto de 2017 y enero-febrero de 2019, que influyeron en las variaciones de las superficies de las lagunas. A pesar de la correlación observada entre el aumento de superficies y mayores precipitaciones, estos eventos son específicos en fechas donde la contribución de precipitación excede el rango típico para el sector (aproximadamente 4,5 mm) y se acerca a los máximos (alrededor de 100 mm). El análisis anual e interanual concluye que, aunque las precipitaciones son relevantes, la variabilidad estacional está principalmente determinada por la evaporación del sistema, respaldando así el modelo conceptual propuesto.

Figura N°6-14. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Aguas de Quelana.



Fuente: Elaboración Propia

6.2.4 Sistema Soncor

- Funcionamiento del Sistema Lagunar

El Sistema Soncor se sitúa en el sector norte de la Zona Marginal del Salar de Atacama, al sureste del delta del río San Pedro. Se compone de las lagunas de Chaxa, Barros Negros y Puilar. La Laguna Chaxa se alimenta desde el norte a través del Canal del Burro Muerto y descarga hacia el sur por otro canal, hacia la Laguna de Barros Negros.

Las lagunas de Barros Negros y Chaxa se sitúan sobre el acuífero de salmuera, mientras que la Laguna Puilar está en las proximidades de la interfase salina, que en esta zona se dispone en dirección norte-sur, perpendicular a la dirección de los flujos de entrada de agua salobre desde los depósitos aluviales del borde este del Salar. La topografía en esta zona es relativamente plana, existiendo una ligera pendiente en dirección hacia el núcleo del salar.

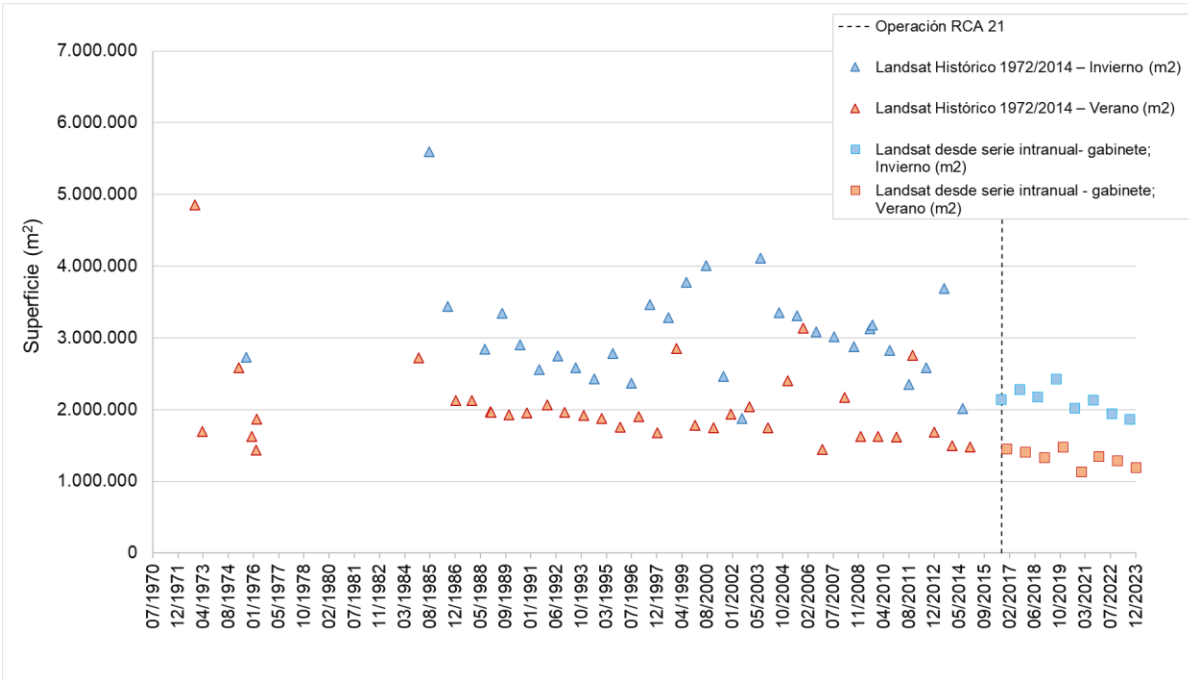
La zona situada al sur de la Laguna Barros Negros representa una zona de acumulación por desbordamiento, y en cierto modo comunicada con el acuífero de salmuera, al encontrarse el nivel en la misma cota.

En resumen, se tiene que, las lagunas de este sistema Soncor son alimentadas por agua subterránea que ingresa al sistema proveniente de los acuíferos situados al norte y este. En la zona donde la interfase salina intercepta con el terreno se producen desbordamientos del agua que fluye hacia el oeste de manera superficial y subsuperficial. La mayor parte de estos flujos se concentra en el canal de Burro Muerto que acaba desembocando en la Laguna Chaxa, mientras otros desbordamientos alcanzan el canal que une la Laguna Chaxa con la Laguna Barros Negros y la propia Laguna de Barros Negros. Una vez que alcanza los canales mencionados, el agua fluye en dirección sur y comienza a sufrir proceso de evaporación, pasando primero por la Laguna Chaxa, después Barros Negros, y finalmente termina saliendo del sistema por la zona de desbordamiento “Cola de Pez” e infiltrándose en el Núcleo.

- Evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

En la Figura N°6-15, se presenta la serie histórica (1972 – 2023) de las superficies lagunares del sector Soncor, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat, en base al índice NDWI. En la serie total, se puede observar que la máxima extensión de las lagunas se produce principalmente durante los meses de invierno, no obstante, se destaca que en junio de 2022 se registró la menor superficie, siendo los meses siguientes aproximadamente un 50% mayores en extensión lagunar. En este caso, la diferencia entre las superficies de los periodos de invierno y verano puede alcanzar aproximadamente el 60%. La tendencia de las superficies asociadas a los inviernos (julio – agosto) muestran un comportamiento variable de aumentos y descensos desde el 2004 (descenso 1986-1996; ascenso 1997-2003; descenso 2004-2014), para luego estabilizarse un poco entre 2015 y 2023. Respecto a las superficies históricas medidas en verano, éstas se observan en general con tendencia al descenso, desde 1984 a la fecha.

Figura N°6-15. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor.



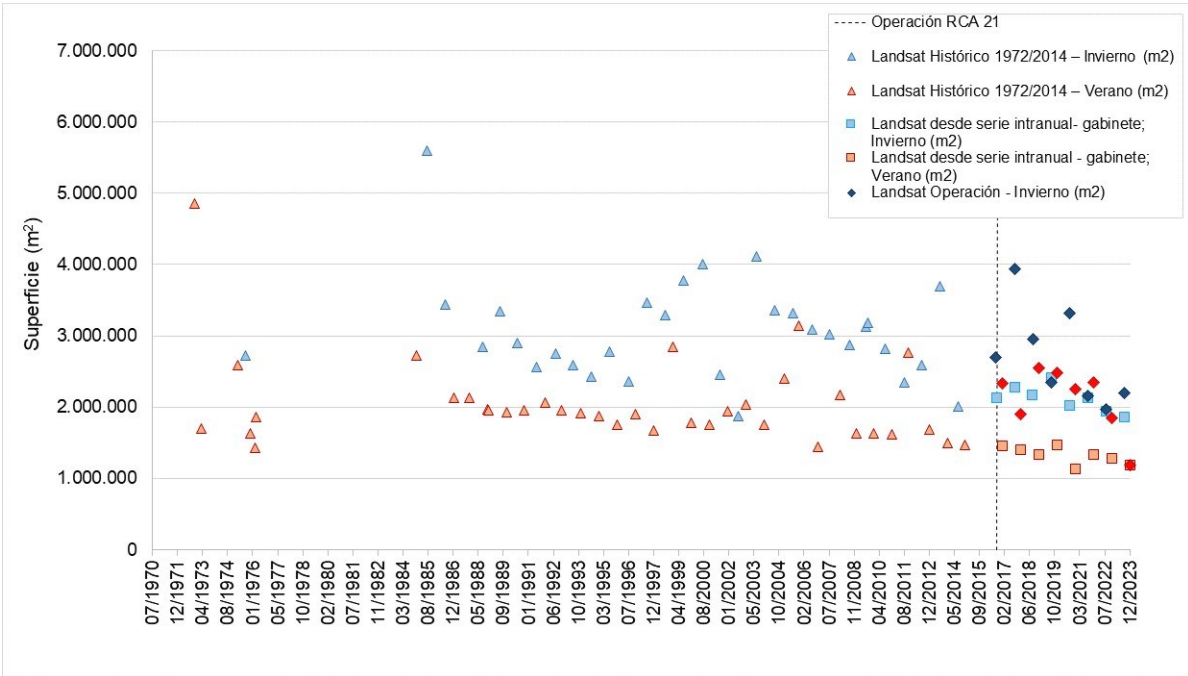
Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación con las superficies históricas (serie Adenda 5 RWL (2015) y serie complementaria)

Los registros de superficies semestrales calculadas con Landsat, (Figura N°6-16) reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2023 como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI, tanto en invierno como en verano, y para las series 1972 – 2014 y 2016 – 2023. Las principales diferencias entre la serie histórica NDWI - Landsat y los resultados de los reportes semestrales en el marco del PSAH, se pueden atribuir a varios factores metodológicos ya mencionados. No obstante, estas diferencias resultan ser menores respecto a los sectores ya analizados, debido a la fisonomía de Soncor, lo cual ayuda en la definición de las lagunas y por ende la brecha entre ambos tipos de metodologías se reduce.

En general, las superficies semestrales presentan valores más cercanos a los máximos históricos de la serie NDWI – Landsat, tanto en invierno como en verano, a excepción del registro de diciembre de 2023 muy similar a lo determinado en la serie NDWI/Landsat.

Figura N°6-16. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Soncor.



Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

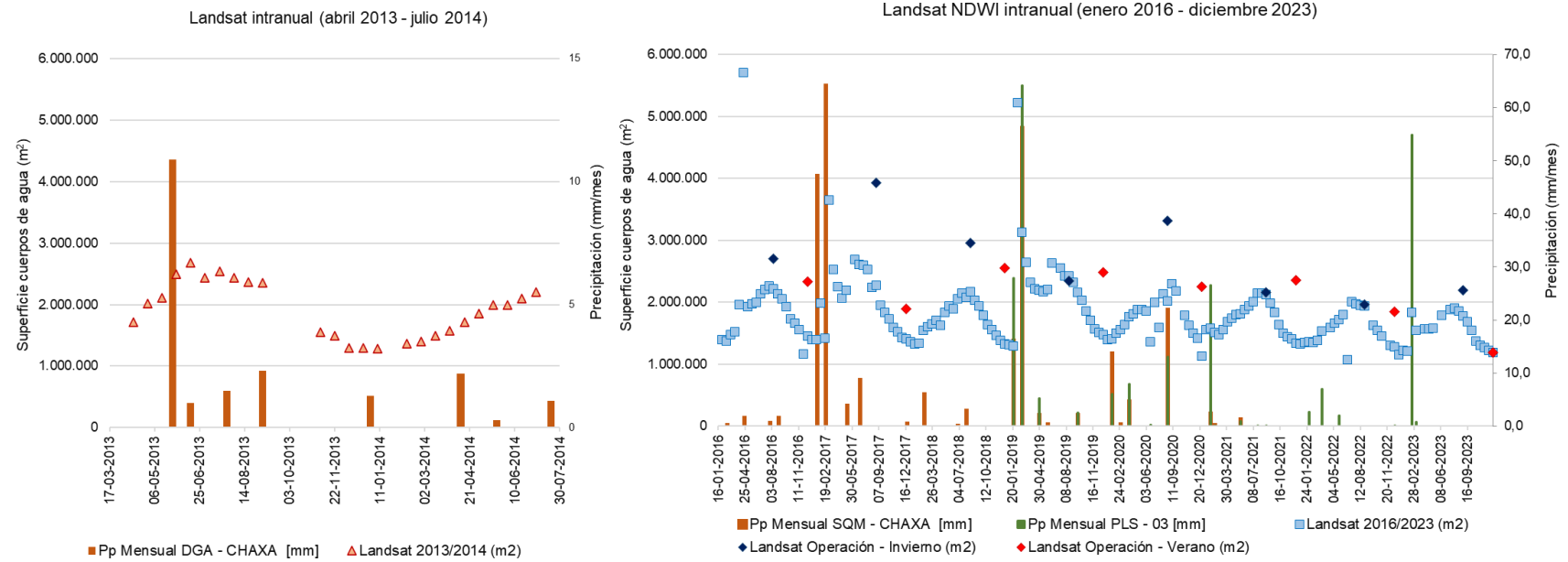
- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

Con respecto a las variaciones intranuales para el sector Soncor, en la Figura N°6-17 se observa la variación de las superficies lagunares mediante el índice NDWI - Landsat, durante los años 2013 – 2014 y 2016 – 2023 y su relación con las precipitaciones.

Del análisis intranual de superficies lagunares realizado en la Adenda 5 (año 2013-2014), se puede observar que la máxima extensión de las lagunas se produce durante los meses de invierno, tras el período de lluvias del primer semestre de 2013, por lo que se podría atribuir cierta relación entre ambas variables, sin embargo, tras registrarse la mínima extensión en el verano de 2014, la superficie lagunar vuelve a aumentar, sin estar este hecho precedido de eventos importantes de precipitación. Asimismo, los registros en la serie 2016 – 2023, también muestran un aumento de las superficies en invierno; mientras que los registros mínimos, se aprecian entre octubre y febrero - marzo. Por lo anterior, se tiene que la precipitación no sería el factor preponderante al cual atribuir la variabilidad estacional del sistema; a excepción de registros puntuales en febrero de 2017, febrero de 2019 y febrero 2023, donde hay una correspondencia entre los registros de precipitaciones y el aumento de las superficies registradas.

Con respecto a las variaciones de las superficies lagunares del índice Landsat/NDWI 2016- 2023 y los registros calculados como parte del PSAH para el sector Soncor, estos últimos se encuentran en el rango de los registros máximos y mínimos para la serie total hasta diciembre de 2023, con agosto de 2019, agosto de 2021 y agosto 2022, al igual que el verano de 2023, presentando valores similares a los observados en la serie NDWI. De la serie Landsat/NDWI 2016- 2023, se observa una leve tendencia a la baja en los valores a partir de 2019 en las superficies máximas de invierno, con estabilidad de las superficies mínimas.

Figura N°6-17. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor.



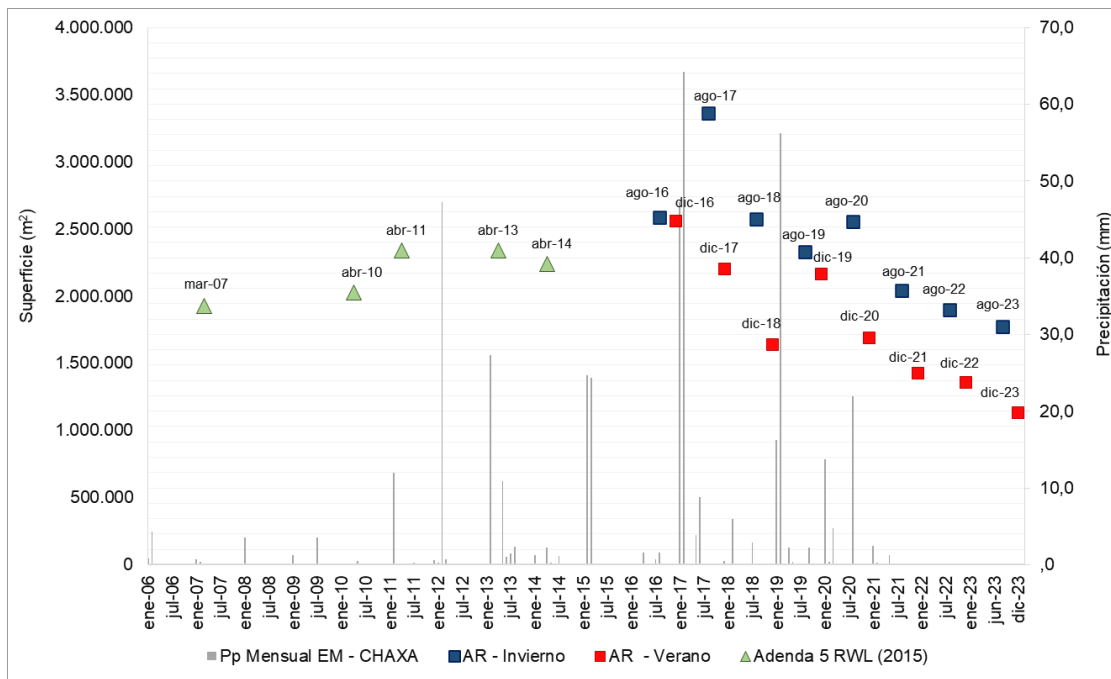
Fuente: Elaboración propia.

- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

Con respecto a la variación de las superficies semestrales del PSAH desde imágenes de alta resolución, para el sector Soncor (Figura N°6-18) se puede observar variabilidad estacional, con meses de agosto con superficies mayores a las registradas en diciembre. En relación con las superficies históricas en AR (Adenda 5 RWL, 2015), las superficies semestrales del PSAH se presentan por sobre y bajo el mínimo de Adenda 5 AR (1.924.000 m²). Dentro de esta comparativa, es importante destacar que las superficies históricas en AR han sido determinadas en meses distintos a los reportados semestralmente en el PSAH (agosto y diciembre), aspecto importante a considerar, dada la variabilidad intranual mostrada anteriormente.

Con respecto a las precipitaciones para el sector¹⁸, para las superficies máximas del periodo 2016 – 2023, el registro de agosto de 2017 esta precedido por 124,1 mm acumulados desde enero a junio de 2017, lo cual repercutió en un aumento de superficie entre ambos meses. Una situación similar se observa en las siguientes temporadas invierno-verano del periodo en cuestión, en donde aumentó la superficie lagunar de invierno 2020 para luego bajar, en diciembre 2020.

Figura N°6-18. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Soncor.



Fuente: Elaboración Propia

¹⁸ La recopilación de información de precipitaciones anuales de la estación meteorológica EM – Chaxa, estación SQM, disponibles en línea en <https://www.sqmsenlinea.com/meteorology/231>.

7 CONCLUSIONES

Con respecto a los resultados de las superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar, al contrastar los resultados semestrales de los cuatro sistemas en 2023, se observa que la mayor cobertura es para el sector Soncor, desde imágenes Pleiades 1-A, tanto en invierno 2023 como en verano 2023, con 1.772.903 m² y 1.128.774 m², respectivamente. En tanto, las menores superficies se presentaron en el sector Aguas de Quelana, en verano 2023 con 59.003 m² y 189.179 m² en invierno 2023 (Tabla N°7-1). El análisis comparativo de las superficies de cuerpos de agua determinadas para el séptimo año de monitoreo 2022 con respecto a los registros históricos se presenta en la Tabla N°7-1.

De los resultados de las campañas para el año 2023, se puede concluir que las estimaciones de superficies lagunares mediante imágenes de alta resolución, para la condición de invierno 2023 se encuentran por sobre el mínimo histórico en los sectores La Punta – La Brava y Aguas de Quelana y bajo el mínimo histórico en los sectores Peine y Soncor; y para la estación de verano (diciembre 2023) todos los sistemas presentaron superficies bajo el mínimo histórico. Dentro de esta comparativa, es importante destacar que las superficies históricas en AR han sido determinadas en meses distintos (marzo – abril) a los reportados semestralmente en el PSAH (agosto y diciembre), aspecto importante a considerar, dada la variabilidad intranual mostrada en la discusión de este informe.

Tabla N°7-1. Superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales (alta y media resolución) y datos obtenidos en el monitoreo 2023 (invierno y verano), respecto de los registros de históricos (Adenda 5 RWL, 2015).

Tipo de imagen	Sistema Lagunar	**Superficie Mínima Histórica Adenda 5 RWL (2015) (ha)	*Superficies lagunares (ha) Monitoreo Fase Operación	
		m ²	Invierno 2023	Verano 2023
			m ²	m ²
Superficies con imágenes de alta resolución	LPLB	316.000	455.090,3	265.615,0
	PE	489.000	293.950,5	220.413,0
	AQ	113.000	189.179,8	59.003,0
	SO	1.924.000	1.772.903,3	1.128.774,0
Superficies con imágenes de media resolución	LPLB	192.000	393.827,2	287.706,7
	PE	254.000	621.914,9	268.952,2
	AQ	2.000	288.145,1	129.567,5
	SO	1.433.000	2.196.775,7	1.191.265,3

Dónde: AQ: Aguas de Quelana, LPLB: La Punta - La Brava, PE: Peine, SO: Soncor.

*Superficies a partir de modelo de clasificación supervisada de imágenes satelitales. (**): Las fechas en que se obtuvieron los registros históricos, corresponden a las que se presentaron en el "Apéndice B. Determinación Espacio Temporal de la Vegetación Azonal y Cuerpos de agua" del "Anexo 2 Plan de Manejo Biótico" y en el "Apéndice L. Monitoreo de dinámica espaciotemporal de lagunas de la Zona Marginal del Salar de Atacama a través de imágenes satelitales LANDSAT" y que se enmarcan en las áreas definidas por los polígonos indicados en la RCA N°21/2016 (Considerando N°7), "Polígonos en Tabla de 3-4 del Anexo 3" del PSAH del proyecto. Fuente: Elaboración Propia

La validación del ajuste de las coberturas determinadas, con relación a los datos de terreno recabados y fotointerpretados, se realizó mediante el índice *Kappa*. Este índice tuvo una variación entre 0,89 y 0,40 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y desde 0,94 y 0,41 para imágenes de resolución media Landsat 8 en agosto de 2023. Respecto de diciembre de 2023, este índice tuvo una variación entre 0,82 y 0,46 para imágenes de alta resolución Pleiades 1-A y desde 0,83 a 0,47 para imágenes de resolución media Landsat 8. Todos los valores antes indicados muestran una alta precisión del modelo de clasificación supervisada aplicado, que según el índice *Kappa* muestra un nivel de concordancia *moderado a casi perfecta*¹⁹.

Los resultados de la correlación entre las superficies calculadas desde de alta resolución (Pleiades 1-A) y desde media resolución (Landsat), y según el coeficiente de correlación de Pearson, muestran relaciones positivas entre las variables en todos los sectores. En el caso del sector La Punta - La Brava, se observó una correlación de 0,763, indicando una relación positiva moderada, respaldada por un valor p significativo de 0,0004 y un coeficiente de determinación (r^2) del 58,2%. De manera similar, en los sectores Peine, Aguas de Quelana y Soncor, se identificaron correlaciones de 0,748, 0,878 y 0,814, respectivamente, todas indicando relaciones positivas y respaldadas por valores p significativos (0,001 o 0,000004) junto con coeficientes de determinación (r^2) que variaron entre el 56,0% y el 77,1%. Estos resultados subrayan la consistencia estadística de las asociaciones entre las variables Pleiades y Landsat en los diferentes sectores analizados.

- Sector La Punta-La Brava

La serie histórica de superficies lagunares entre 1972 y 2023, basada en imágenes satelitales Landsat y el índice NDWI, ofrece una visión detallada de las variaciones estacionales. Se destaca la máxima extensión durante los inviernos y los registros más bajos generalmente en verano, con eventos destacados en marzo 1973, diciembre 2016 y diciembre 2020. La tendencia histórica muestra una disminución de las superficies invernales desde el año 2000, y la brecha entre inviernos y veranos se ha acortado desde 2008, con un quiebre en la tendencia de las superficies invernales en 2021-2023, evidenciando un descenso.

Las observaciones durante el monitoreo (2016-2023) muestran que las superficies calculadas con Landsat en el marco del PSAH están dentro de los registros históricos, tanto en invierno como en verano, siendo consistentes con los datos NDWI. Las diferencias entre la serie histórica NDWI - Landsat y los informes semestrales del PSAH se atribuyen a mejoras metodológicas, como el robustecimiento del procesamiento de imágenes y la validación en terreno, que han depurado límites de cuerpos de agua y calibrado los modelos de clasificación.

En cuanto a las variaciones intranuales, la comparación entre los años 2013-2014 y 2016-2023 muestra una relación menos directa entre las precipitaciones y las superficies lagunares. Aunque se observan aumentos de superficie en invierno y descensos en verano, la amplitud de la variación es pequeña. La

¹⁹ Valores cercanos a 1,00 indican una mayor concordancia inter-observador. Los rangos de valores son: Pobre: 0,00; Leve: 0,01 – 0,20; Aceptable: 0,21 – 0,40; Moderada: 0,41 – 0,60; Considerable: 0,61 – 0,80; Casi perfecta: 0,81 – 1,00 (Landis y Koch, 1977).

falta de una correspondencia directa entre las superficies y la precipitación, excepto en casos puntuales, sugiere que otros factores, como la evaporación y los niveles de aguas subsuperficiales, podrían desempeñar un papel más significativo en las variaciones intranuales.

La variación semestral de las superficies lagunares determinadas en el PSAH, evaluada con imágenes de alta resolución, muestra divergencias con los registros históricos, especialmente en verano desde 2020. Para los meses de invierno no hay variaciones, con valores sobre los registros de la Adenda 5 RWL (2015). A pesar de los aportes de precipitaciones registrados entre 2016 y 2023, la relación entre estas y las variaciones en las superficies lagunares no es determinante.

- Sector Peine

La serie histórica de imágenes de mediana resolución (1972-2023) revela importantes fluctuaciones en las superficies lagunares durante los inviernos hasta 2014, destacando máximos en 1985 y mínimos en 1975. Posteriormente, tanto inviernos como veranos muestran una tendencia a la baja desde 2015 hasta 2023. El PSAH entre 2016-2023 presenta registros de superficies calculadas con Landsat que se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según la variación del índice NDWI, tanto en invierno como en verano, y para las series 1972 – 2014 y 2016 - 2023.

Las diferencias entre la serie histórica NDWI-Landsat y las superficies reportadas en los informes semestrales del PSAH se atribuyen a robustas mejoras en la metodología de procesamiento, la inclusión de índices espectrales y la validación en terreno. Las variaciones intranuales para el sector Peine exhiben una mayor variabilidad desde 2016-2023 en comparación con 2013-2014. Se observa un aumento puntual en las superficies lagunares en 2013 y 2020 asociado a eventos de precipitación, pero no se evidencia una relación directa consistente entre las precipitaciones y las variaciones lagunares.

La comparación de las superficies semestrales del PSAH con las históricas en AR muestra que, desde el invierno de 2021, estas están por debajo del mínimo histórico en AR. Las variaciones estacionales en Peine, respaldadas por imágenes Landsat, confirman el modelo conceptual formulado durante la evaluación del proyecto. Aunque se observa cierta relación entre las precipitaciones y las variaciones en las superficies lagunares en algunos casos, la falta de consistencia sugiere la influencia de otros factores, como la evaporación y los niveles subsuperficiales.

- Sector Aguas de Quelana

La serie histórica (1972-2023) de superficies lagunares en el sector Aguas de Quelana, analizada mediante imágenes satelitales Landsat y el índice NDWI, muestra importantes variaciones. Durante los inviernos hasta 2014, se observan extensiones máximas en 1985 y 1986, pero en años recientes (2020-2022) se registran extensiones mínimas alrededor de 35,000 m². Los veranos, en general, presentan menor extensión, con máxima excepcional en 1972 y promedios alrededor de 60,000 m², mientras que diciembre de 2014 muestra extensiones mínimas de 10,000 m².

La serie de datos indica que las mayores extensiones lagunares se dan principalmente en invierno, con una tendencia a la baja desde 2014 en ambas temporadas. Los registros de superficies calculadas con

Landsat entre 2016 y 2023, como parte del PSAH, se encuentran dentro de los máximos y mínimos históricos según el análisis del índice NDWI.

Las diferencias entre la serie histórica NDWI-Landsat y las superficies reportadas en los informes semestrales del PSAH se atribuyen a mejoras metodológicas, incluyendo el fortalecimiento del procesamiento de imágenes con la incorporación de otros índices espectrales. La validación en terreno y el análisis visual también contribuyen a refinar los límites de los cuerpos de agua. Las variaciones intranuales desde 2013-2014 hasta 2016-2023 muestran aumentos en invierno y descensos en verano, sin una correlación directa con las precipitaciones, respaldando el papel predominante de la evaporación en el sistema.

La variación de las superficies semestrales del PSAH en Aguas de Quelana, analizadas con imágenes de alta resolución, supera el mínimo histórico para invierno pero se sitúa por debajo en comparación con verano. La comparación con las precipitaciones destaca eventos importantes, como en agosto de 2017 y enero-febrero de 2019, que influyen en las variaciones de superficies. Aunque existe correlación entre aumentos de superficies y mayores precipitaciones, estos eventos son específicos y no siempre siguen un patrón consistente, reforzando la influencia predominante de la evaporación en la variabilidad estacional del sistema lagunar.

- Sector Soncor

La serie histórica (1972-2023) de las superficies lagunares en el sector Soncor, analizada mediante imágenes satelitales Landsat y el índice NDWI, muestra que la máxima extensión de las lagunas se observa principalmente en invierno. En junio de 2022, se registra la menor superficie, seguida de un aumento del 50% en los meses siguientes. La tendencia de las superficies asociadas a los inviernos (julio – agosto) muestran un comportamiento variable de aumentos y descensos desde el 2004, para luego estabilizarse entre 2015 y 2023, mientras que las superficies de verano muestran una tendencia general a la baja desde 1984.

Los registros semestrales calculados con Landsat entre 2016 y 2023, como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis del índice NDWI. Las diferencias entre la serie histórica NDWI-Landsat y los informes semestrales del PSAH son menores en comparación con otros sectores, gracias a la fisonomía de Soncor que facilita la definición de las lagunas.

En el análisis intranual de 2013-2014, se observa la máxima extensión lagunar durante el invierno, pero después de un mínimo en verano de 2014, la superficie lagunar vuelve a aumentar sin eventos significativos de precipitación. En la serie 2016-2023, se registra un aumento de las superficies en invierno, con mínimos entre octubre y febrero-marzo. La relación entre precipitaciones y aumento de superficies se observa en registros puntuales en febrero de 2017, febrero de 2019 y febrero de 2023.

Las variaciones de las superficies lagunares de Landsat/NDWI entre 2016 y 2023 y los registros del PSAH para Soncor se encuentran en el rango de los máximos y mínimos históricos hasta diciembre de 2023. La serie Landsat/NDWI muestra una leve tendencia a la baja en las superficies máximas de invierno a partir de 2019, con estabilidad en las superficies mínimas.

Las superficies semestrales del PSAH desde imágenes de alta resolución para Soncor presentan variabilidad estacional, con meses de agosto con superficies mayores a las registradas en diciembre. En comparación con las superficies históricas en AR, las superficies semestrales del PSAH están por encima y por debajo del mínimo de AR (1,924,000 m²). Se destaca que las comparaciones deben considerar la variabilidad intranual debido a la diferencia en los meses de medición.

En relación con las precipitaciones para el periodo 2016-2023, se observa que las superficies máximas están precedidas por eventos significativos de precipitación, como en agosto de 2017 con 124.1 mm acumulados de enero a junio de 2017. Situaciones similares se observan en las temporadas invierno-verano del periodo, donde el aumento de superficie lagunar se relaciona con precipitaciones importantes.

8 REFERENCIAS

ANEXO 1, ADENDA 5 EIA, APÉNDICE I, PROYECTO ROCKWOOD LITHIUM 2015. Funcionamiento Hidrogeológico de los Sistemas Lagunares La Punta – la Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor. Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico, Sector Sur del Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Rockwood Lithium Limitada – SGA, Soluciones y Gestión ambiental. Región de Antofagasta, 246 pp.

ANEXO 1, ADENDA 5 EIA, APÉNDICE L, PROYECTO ROCKWOOD LITHIUM 2015. Monitoreo de dinámica espacio – temporal de lagunas de la Zona Marginal del Salar de Atacama a través de Imágenes Satelitales. Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico, Sector Sur del Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Rockwood Lithium Limitada – SGA, Soluciones y Gestión ambiental. Región de Antofagasta, 246 pp.

ANEXO 2, ADENDA 5 EIA, APÉNDICE B, PROYECTO ROCKWOOD LITHIUM 2015. Determinación espacio temporal de la vegetación azonal y cuerpos de agua. Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Rockwood Lithium Limitada - CEA, Centro de Ecología Aplicada. Región de Antofagasta, 10-2015.

ANEXO 3, ADENDA 5 EIA, PROYECTO ROCKWOOD LITHIUM 2015. Plan de seguimiento ambiental y Plan de alerta temprana de los recursos hídricos. Estudio de Impacto Ambiental - Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Rockwood Lithium – SGA. Región de Antofagasta.

ALBEMARLE - VAI, 2023. Informe Técnico de Investigación N°3 Activación PAT Alerta Temprana- Sector Alerta Acuífero (julio 2023)- Anexo D. Informe Teledetección Satelital Landsat Cuerpos de Agua Sectores La Punta La Brava y Peine. Albemarle – HIDROMAS. Junio 2023.

- CHANDER G., B. Markham, D. Helder, 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, Remote Sensing of Environment, Volume 113, Issue 5, 893-903 pp.
- CHUVIECO, E. 2006. Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel, Barcelona, España.
- CONGALTON, R. G., ODERWALD, R. G. & MEAD, R. A. 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 49: 1671-1678.
- CONGALTON, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 37: 35-46.
- CORNELLÀ, O., SALAS, J., ARAVENA, R., GUZMÁN, E., GUIMERÁ, J., TORE, C., VON IGEL, W., HENRÍQUEZ, A, FOCK, A. Hidrogeología de los sistemas lagunares del margen E del Salar de Atacama. XII Congreso Geológico Chileno. Santiago, 22-26 de noviembre, 2009.
- CRIST, E. P. AND CICONE R.C. 1984. Application of the Tasseled Cap concept to simulated Thematic Mapper data, Photogrammetric, Eng. Remote Sens Vol. 50(3), 343-352.
- CRIST, E. P., LAURIN, R., AND CICONE, R.C. 1986. Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data. In Proceedings of IGARSS' 86 Symposium, 1465- 70.
- DGA, Dirección General de Aguas. 2014. División de Estudios y Planificación. Análisis de los mecanismos de evaporación y evaluación de los recursos hídricos del Salar de Atacama. Santiago, 2014.
- FLORES CARTAGENA, D. 2002. Identificación y Análisis de Cambios en Bofedales de la Cordillera Occidental y del Altiplano de Bolivia. Tesis Maestría en Ciencias, Conservación de Cuencas.
- HERNÁNDEZ, H. J. Apuntes de clases de SIG y Percepción Remota. Magíster en áreas silvestres y conservación de la naturaleza. Universidad de Chile. 2005.
- HUDSON, W. D. & RAMM, C. W. 1987. Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 53: 421-422.
- IZUMI, 2021. Informe Teledetección Satelital Landsat Cuerpos de Agua Sectores La Punta La Brava y Peine. Albemarle. Anexo D, Albemarle-VAI, 2021.
- KAUTH, R. J., & THOMAS, G. S. (1976). The tasseled cap a graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen in Landsat. In Proceedings of the symposium on

machine processing of remotely sensed data, LARS, Purdue University, West Lafayette, IN (pp. 441 - 451).

LANDIS J, KOCH G, 1977: The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 1977; 33:159-74.

LAMOLDA H. Estudio de la influencia de las correcciones a imágenes Landsat ETM+ en la obtención de propiedades de cubiertas vegetales. Tesis de pregrado para optar a la titulación en ingeniero técnico en topografía. Universidad Politécnica de Madrid. 124 pp. 2008.

MORAGA, A.; CHONG, G.; FORTT, M.A.; HENRIQUEZ, H. 1974. Estudio geológico del salar de Atacama, Provincia de Antofagasta. *Boletín del Instituto de Investigaciones Geológicas*, Santiago, Chile, 29, 56p.

MMA, Ministerio de Medio Ambiente, Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) y Dirección General de Aguas (DGA). Guía para la Conservación y Seguimiento Ambiental de Humedales Andinos. Santiago, 2011.

ORTIZ, C., ARAVENA, R., BRIONES, E., SUAREZ, F., TORE, C. & MUÑOZ, J.F., 2014. Sources of surface water for the Soncor ecosystem, Salar de Atacama basin, northern Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 59 (2), 336 – 350.

RCA N°21/2016. Resolución exenta N°21, Antofagasta, 2016. Calificación ambiental del Proyecto “EIA Modificaciones y Mejoramientos de Sistema de Pozas de Evaporación Solar, en el Salar de Atacama”.

ALB, Albemarle. 2016a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año I, agosto de 2016.

ALB, Albemarle. 2016b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año I, diciembre de 2016.

ALB, Albemarle. 2017a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año II, agosto de 2017.

ALB, Albemarle. 2017b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de

Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año II, diciembre de 2017.

ALB, Albemarle. 2018a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año III, agosto de 2018.

ALB, Albemarle. 2018b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año III, diciembre de 2018.

ALB, Albemarle. 2019a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año IV, agosto de 2019.

ALB, Albemarle. 2019b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año IV, diciembre de 2019.

ALB, Albemarle. 2020a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año V, agosto de 2020.

ALB, Albemarle. 2020b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año V, diciembre de 2020.

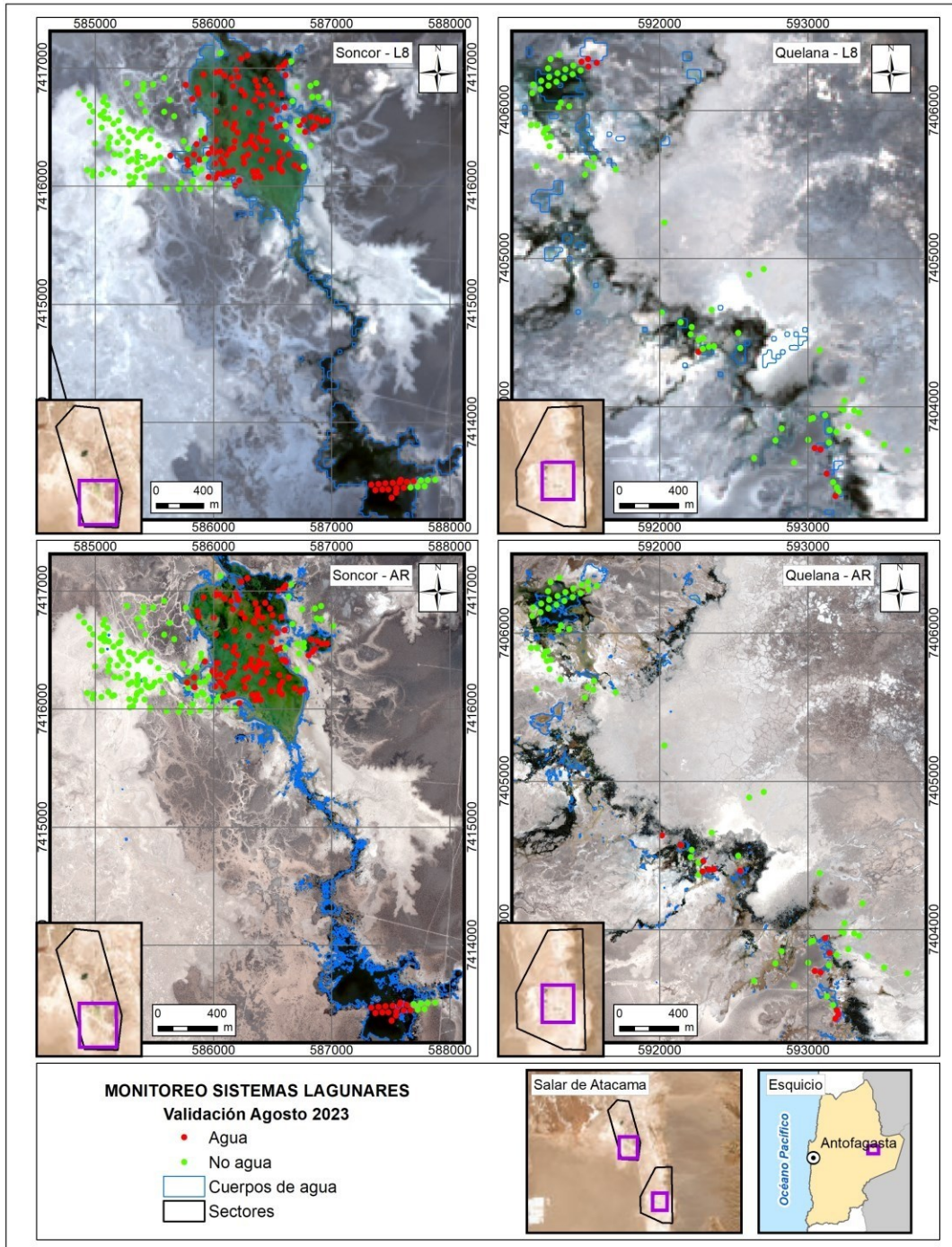
ALB, Albemarle. 2021a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VI, agosto de 2021.

ALB, Albemarle. 2021b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VI, diciembre de 2021.

-
- ALB, Albemarle. 2022a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VII, agosto de 2022.
- ALB, Albemarle. 2022b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VII, diciembre de 2022.
- ALB, Albemarle. 2023a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VIII, agosto de 2023.
- ALB, Albemarle. 2023b. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE-N°21/2016), Monitoreo Año VIII, diciembre de 2023.
- WANG, Q., LI, P., CHEN, X., 2012. Retrieval of soil salt content from an integrated approach of combining inversed reflectance model and regressions: an experimental study. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 50, 3950–3957.
- XU, HANQIU, 2007. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27:14, 3025-3033.

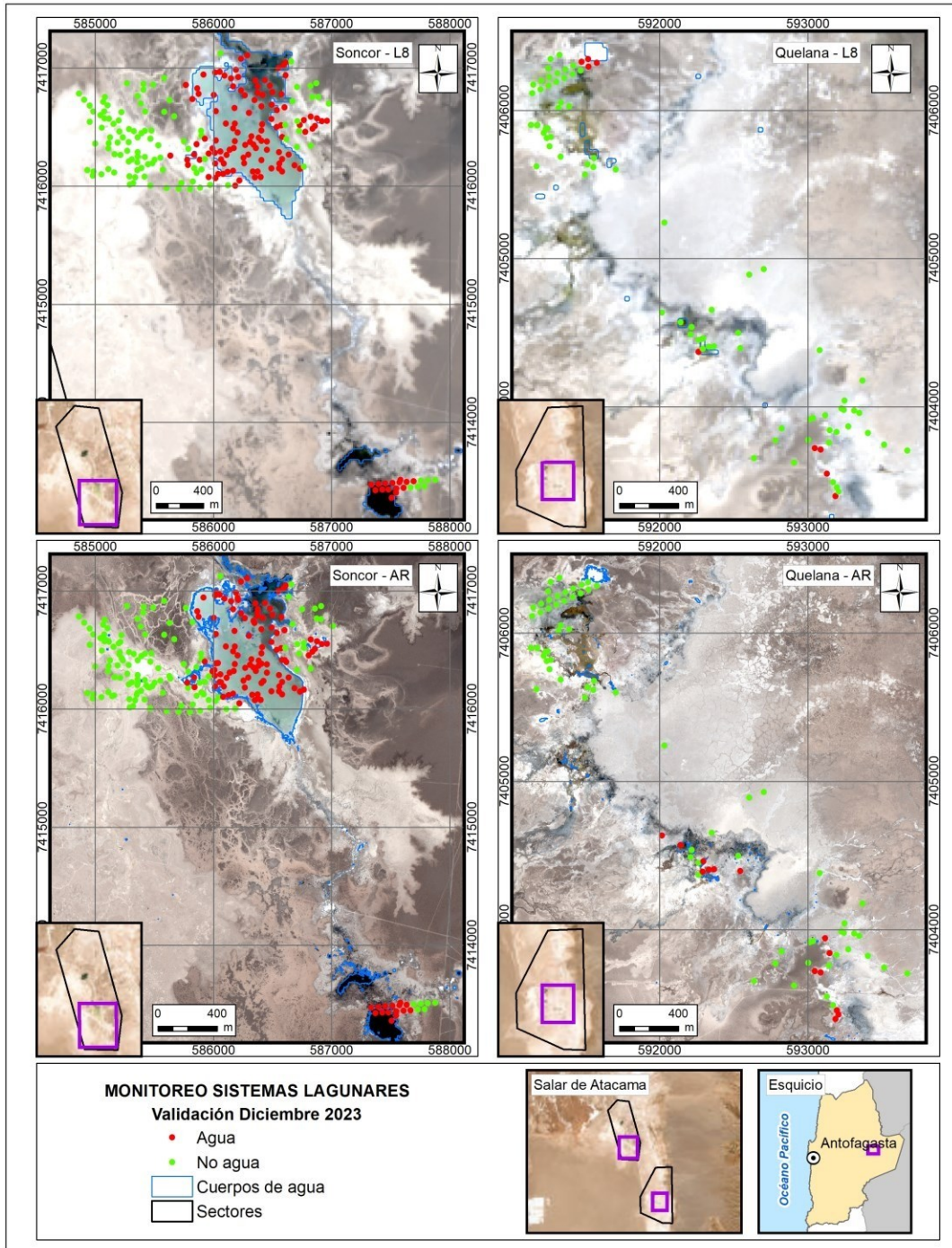
9 ANEXOS

ANEXO 9-1. Distribución de puntos de validación para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, invierno 2023.



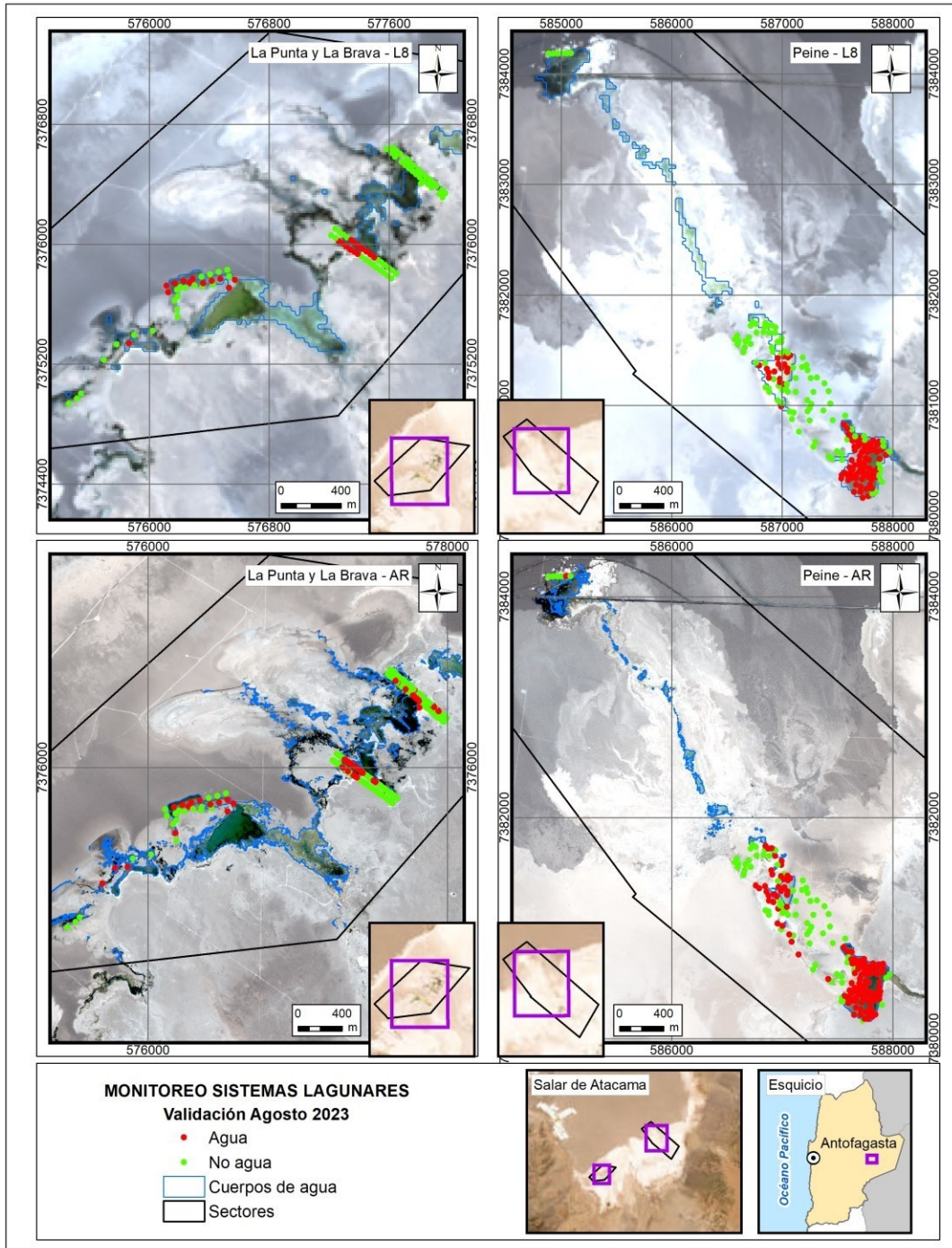
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-2. Distribución de puntos de validación para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, verano 2023.



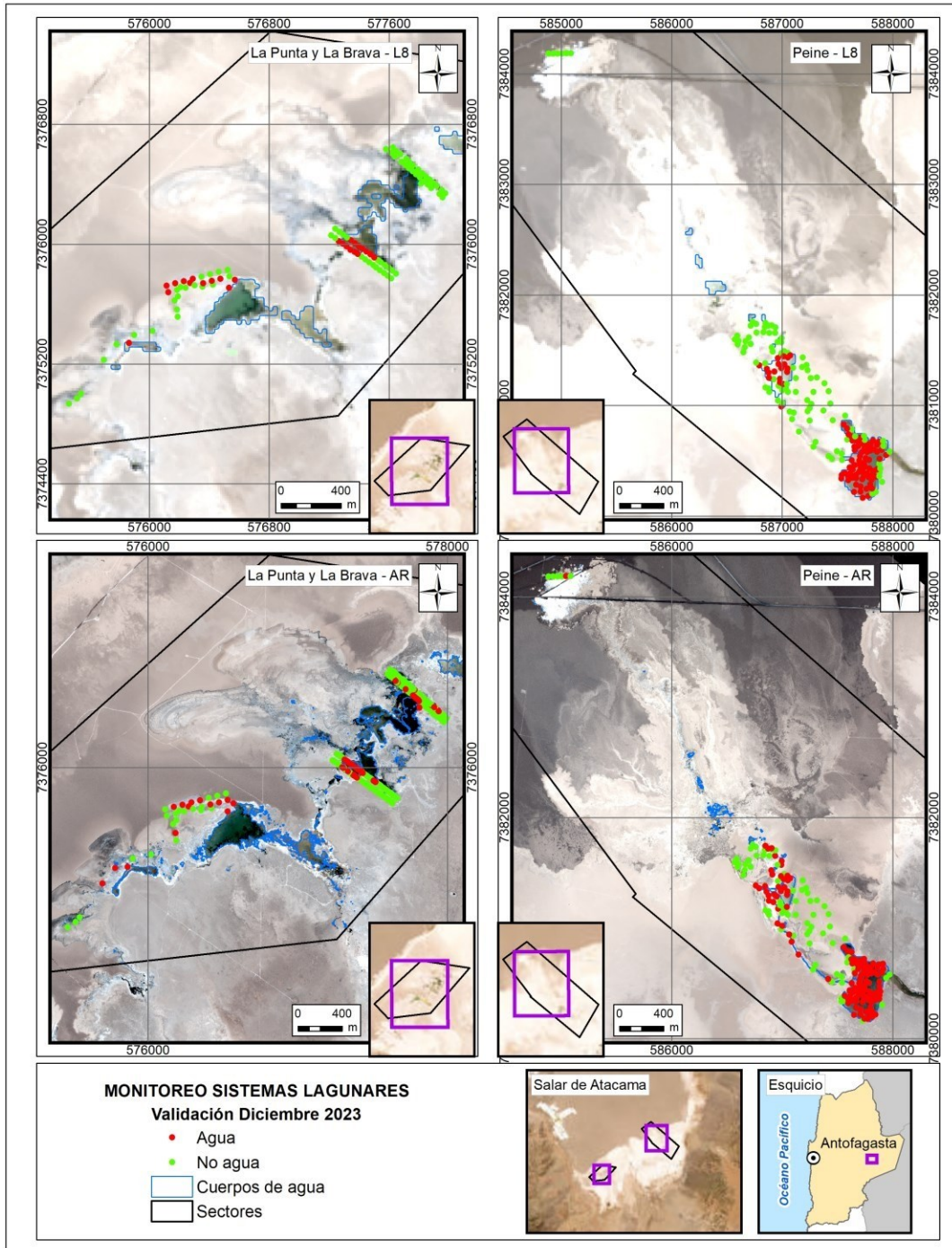
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-3. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector sur, invierno 2023.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-4. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A, sector norte, verano 2023.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-5. Coordenadas de puntos de validación en terreno

Archivo adjunto en formato Excel:

ALB_PM_VALID_AR_L8_AGO23_DIC23_05022024.xlsx

ANEXO 9-6. Cuadro comparativo de diferencias implementadas en el estudio actual respecto a Adenda 5 RWL (2015).

MATERIALES Y MÉTODOS CON MODIFICACIÓN	Adenda 5 RWL, 2015	MONITOREO FASE DE OPERACIÓN (CEDREM Consultores)	DESCRIPCIÓN DE MODIFICACIÓN APLICADA
1. Imágenes satelitales de alta resolución	Worldview 2, Geoeye 1 y Quickbird 2.	Pleiades 1-A	<p>Se ha implementado este cambio con el objetivo de agilizar la cobertura de extensas áreas en un período reducido, sin necesidad de una confirmación prolongada, utilizando un único sensor para garantizar la homogeneidad de los datos. Este ajuste ha resultado en una mayor coherencia entre los datos al reducir el intervalo temporal necesario para completar la cobertura de cada polígono. Además, se ha ampliado el ancho de la franja, lo que facilita la integración de menos escenas y mejora el grado de coregistro de las imágenes, aspecto crucial para la detección de cambios en estudios multitemporales.</p> <p>Es importante destacar que las diferencias en resolución espectral y espacial entre estas imágenes son mínimas, lo que resulta en variaciones menores en los análisis realizados.</p>
2. Validación en terreno	No especificado	Índice <i>Kappa</i> en base a diseño de muestreo estadístico aleatorio – estratificado, por sistema lagunar.	<p>Contribuye a realizar una evaluación numérica, objetiva y con presencia de un indicador, de la certidumbre en el modelo y, por ende, conocer la bondad de ajuste en las coberturas obtenidas.</p> <p>La validación en terreno en categorías “agua” y “no agua” permite una evaluación binaria que da certidumbre al modelo.</p>
3. Procesamiento de imágenes satelitales – Corrección atmosférica	IARR (por su sigla inglés, promedio interno de reflectancia relativa).	Proceso de remoción del error atmosférico proporcionado por el modelo de <i>Airbus</i> ~ ATCOR (por su sigla en inglés, Atmospheric & Topographic Correction)	<p>Este modelo propende la remoción del efecto atmosférico, mientras que IARR lo estandariza sobre la imagen. Por lo mismo, genera una respuesta espectral –corregida- más clara en los objetos de clasificación.</p> <p>La corrección utilizada (con mejor efecto de remoción del error atmosférico), conllevó a que tanto los parámetros</p>

MATERIALES Y MÉTODOS CON MODIFICACIÓN	Adenda 5 RWL, 2015	MONITOREO FASE DE OPERACIÓN (CEDREM Consultores)	DESCRIPCIÓN DE MODIFICACIÓN APLICADA
			espectrales, como el modelo de clasificación, fueran más sensibles a la detección de cuerpos de agua.
4. Parámetros espectrales del modelo de clasificación	<ul style="list-style-type: none"> • NDWI, • Reflectancia NIR y • Reclasificación de bandas espectrales. 	<ul style="list-style-type: none"> • NDWI, • Reflectancia NIR, • Reclasificación de bandas espectrales (en Pleiades 1-A), • NDVI, • Transformada <i>Tasseled Cap "Wetness"</i> (en Landsat 8) 	<p>Esta modificación, se realizó con el fin de robustecer el modelo ya desarrollado y en consideración que los suelos salinos afectan la reflectancia del suelo y puede conducir a errores significativos durante interpretaciones espectrales.</p> <p>En el modelo de clasificación, la incorporación de más parámetros espectrales condujo principalmente a una mayor sensibilidad en la detección de cuerpos de agua.</p>
5. Umbrales de clasificación	Clasificación asistida (procedimiento no especificado)	Mejor respuesta entre métodos de clasificación de datos por cuantiles, intervalos equivalentes y quiebres naturales. Además, clasificación asistida en base al patrón de coberturas históricas.	Esta modificación, se basó en establecer <i>métricas estadísticas</i> que podrán ser replicables en los monitoreos posteriores, más allá del valor número del umbral, el cual puede estar sujeto a variaciones multitemporales y entre imágenes satelitales.
6. Regla de clasificación de píxeles en cuerpo de agua	Cumplía con los umbrales de corte de los tres parámetros espectrales de clasificación.	Cumplía con los umbrales de corte en al menos tres de los cuatro parámetros espectrales de clasificación.	Esta modificación, se realizó con el fin de robustecer el modelo ya desarrollado y en consideración de evitar errores significativos durante interpretaciones espectrales. Así mismo, se clasificaron en cuerpos de agua a los píxeles que tuvieran una alta probabilidad de pertenecer a este tipo de recubrimiento.
7. Fechas de medición	Durante invierno altioplánico: enero-abril.	Durante invierno y verano ~ agosto y diciembre del 2016 al 2021.	Corresponde con lo establecido por el Plan de Manejo Biótico. Esta modificación, influye sobre las coberturas lagunares, según variaciones estacionales intranuales propias de los sistemas en el área de estudio.

ANEXO 9-7. Metadata de Imágenes de alta resolución – Pleiades 1-A

Archivos en formato *.pdf, en las carpetas adjuntas:

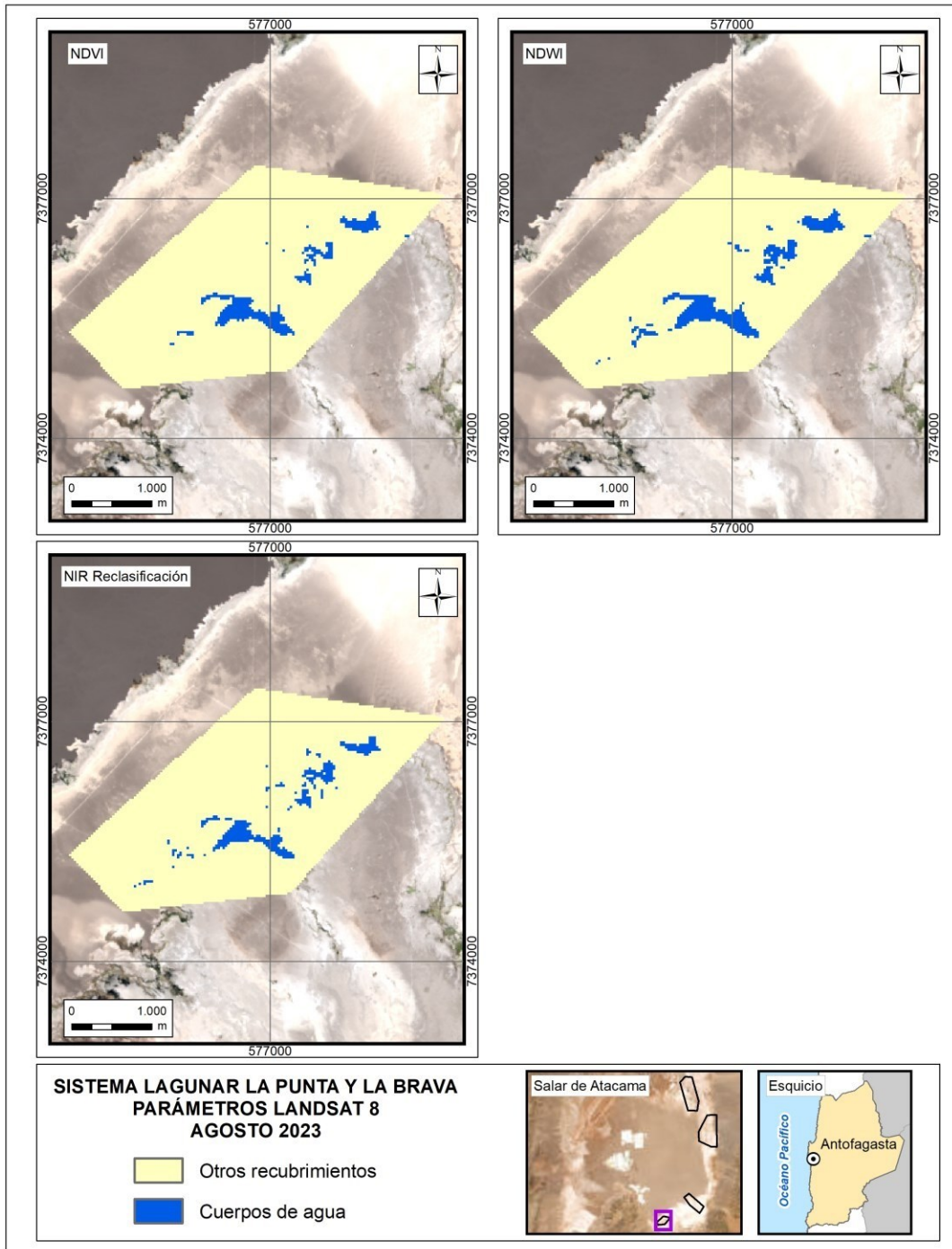
METADATA\Metadata_IMA_Pleiades\AGO23 ; METADATA\Metadata_IMA_Pleiades\DIC23

ANEXO 9-8. Metadata de Imágenes de media resolución – Landsat

Archivos en formato *.pdf, en las carpetas adjuntas:

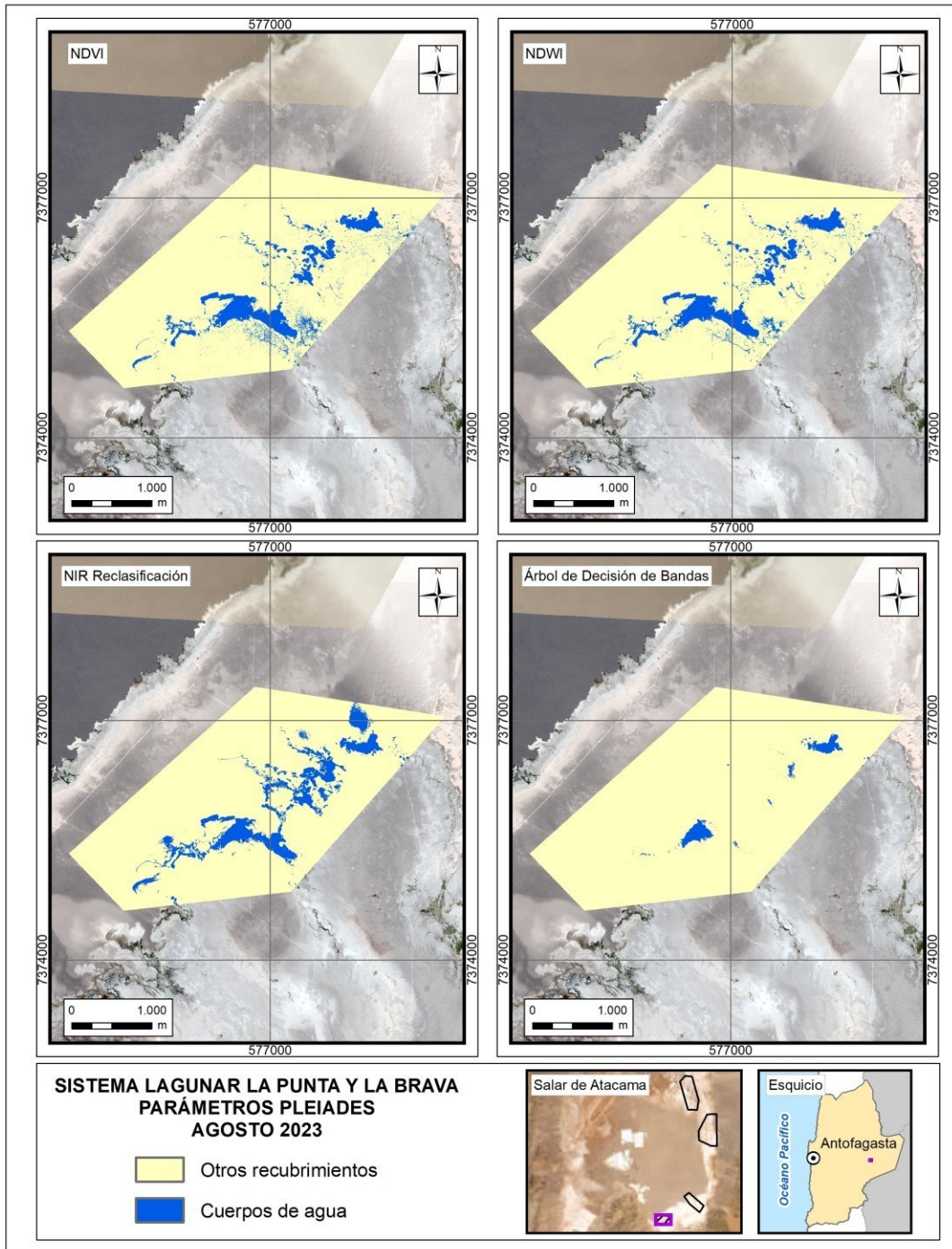
METADATA\Metadata_IMA_L8\AGO23 ; METADATA\Metadata_IMA_L8\DIC23

ANEXO 9-9. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Landsat 8, invierno 2023.



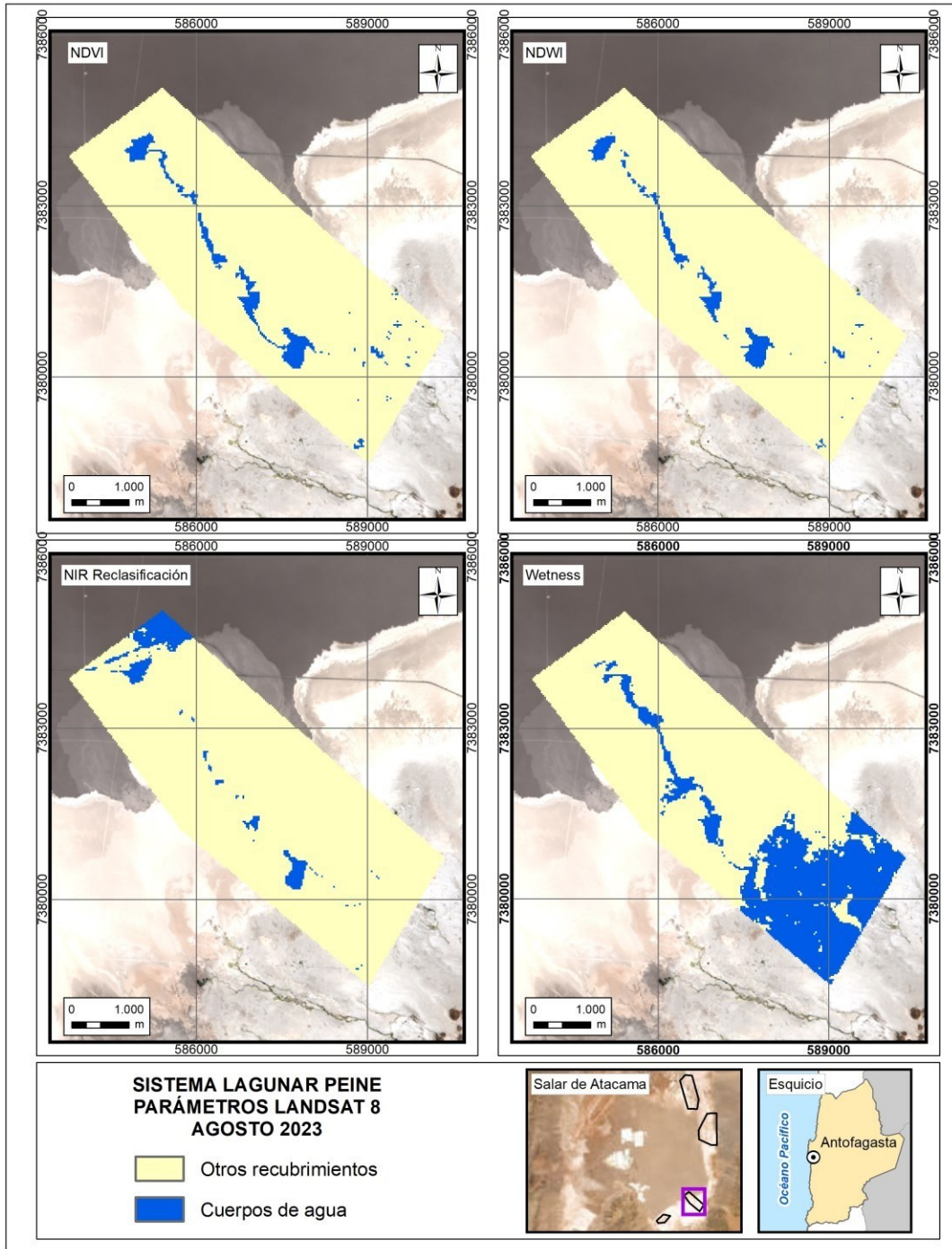
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-10. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2023.



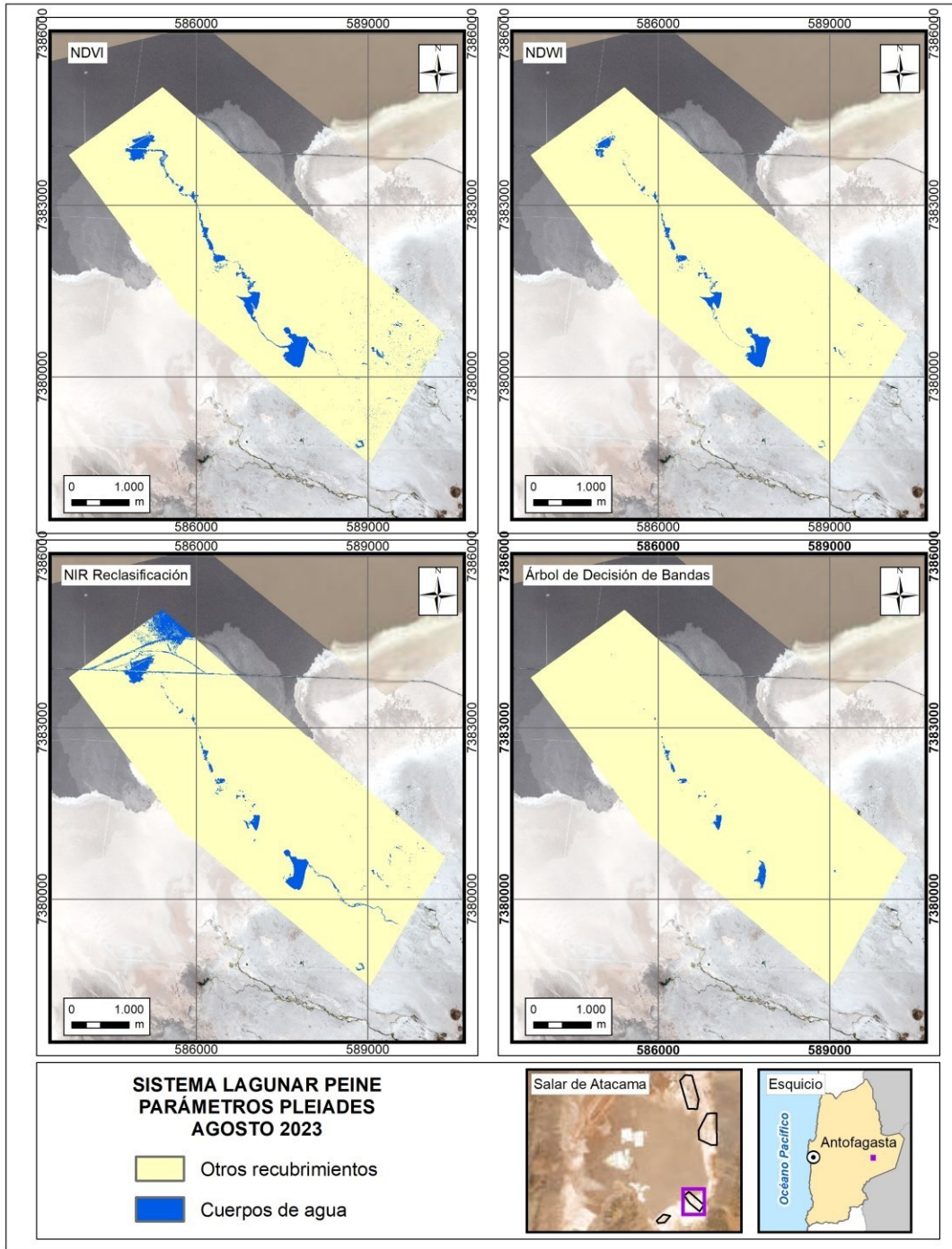
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-11. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Landsat 8, invierno 2023.



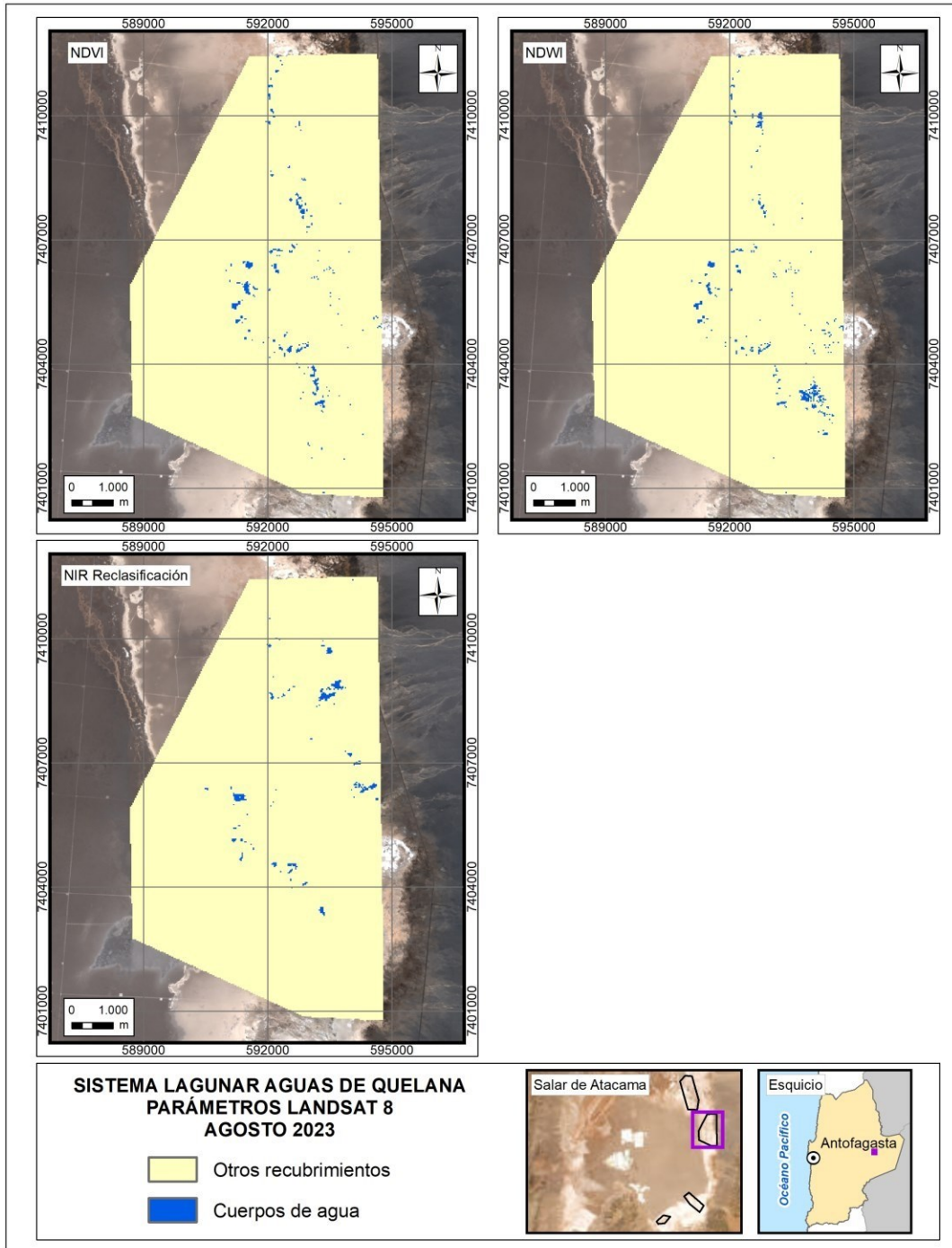
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-12. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2023.



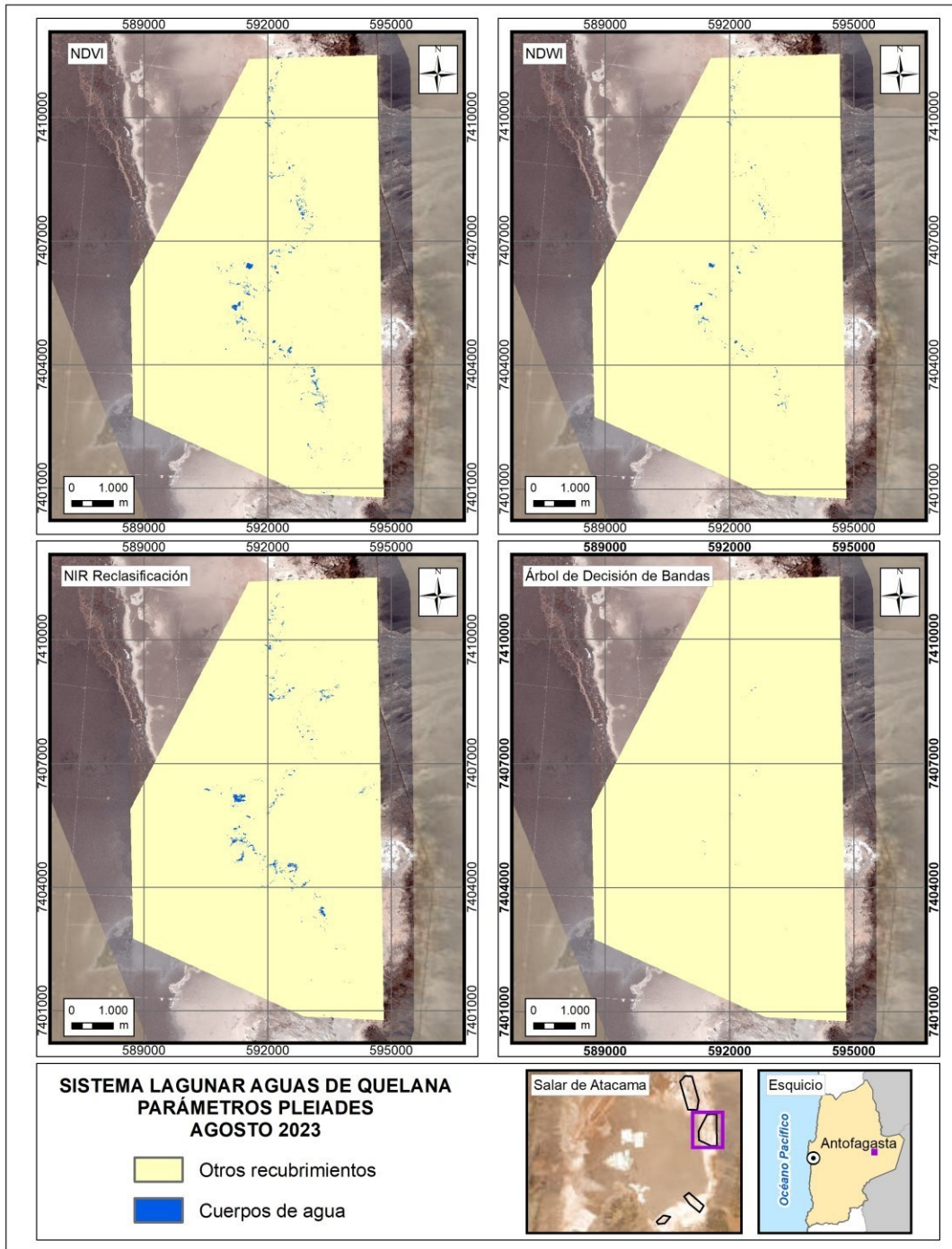
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-13. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Landsat 8, invierno 2023.



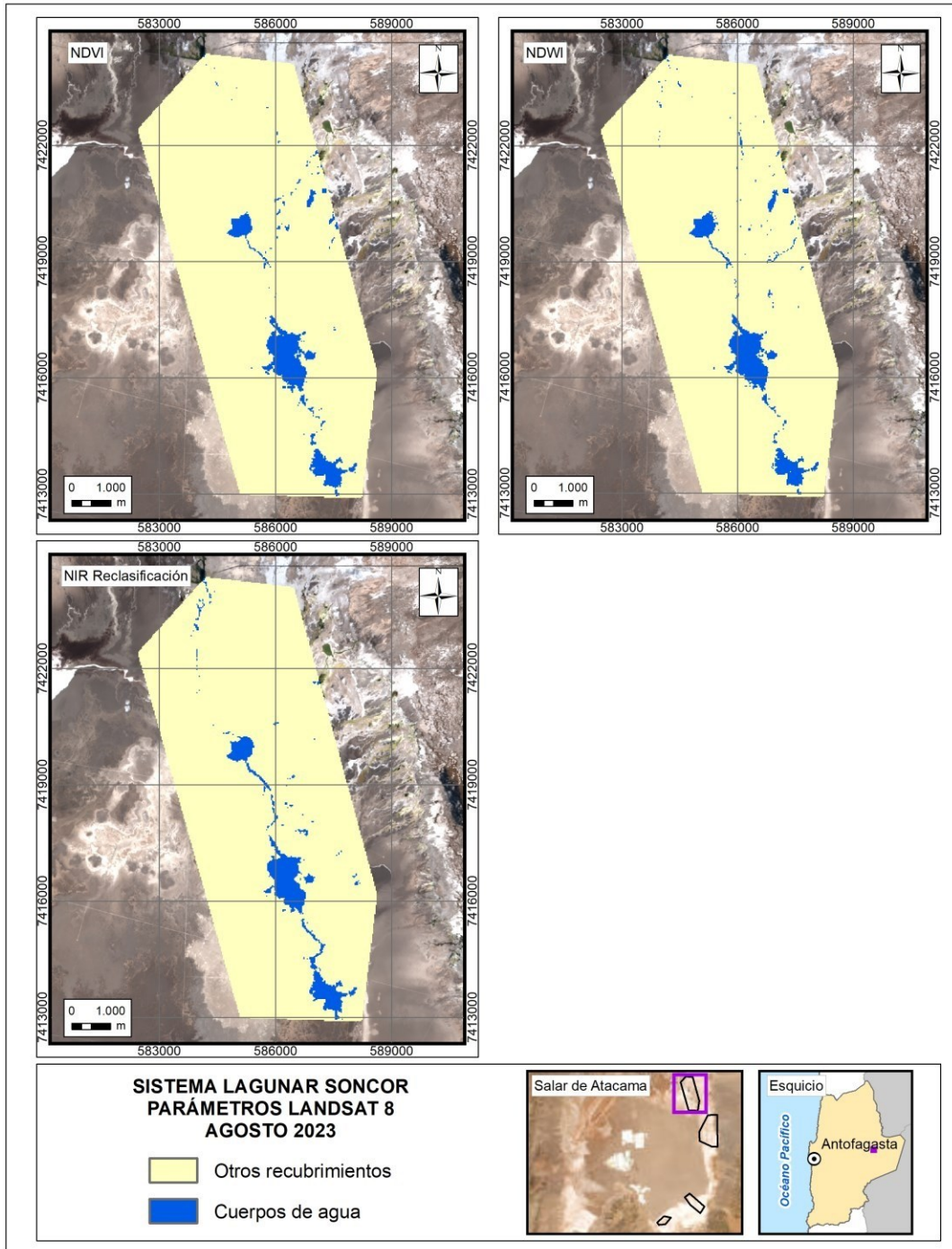
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-14. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2023.



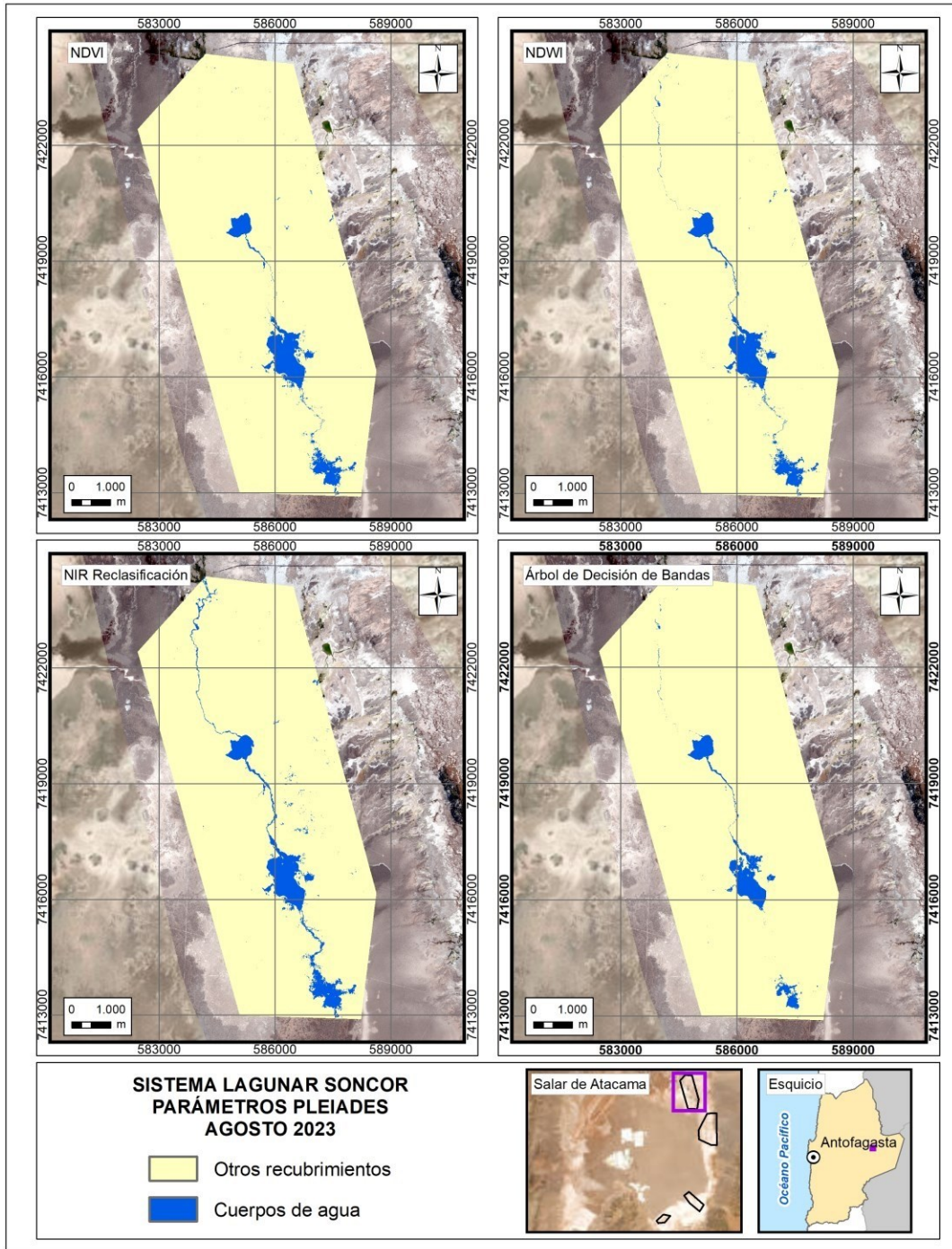
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-15. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Landsat 8, invierno 2023.



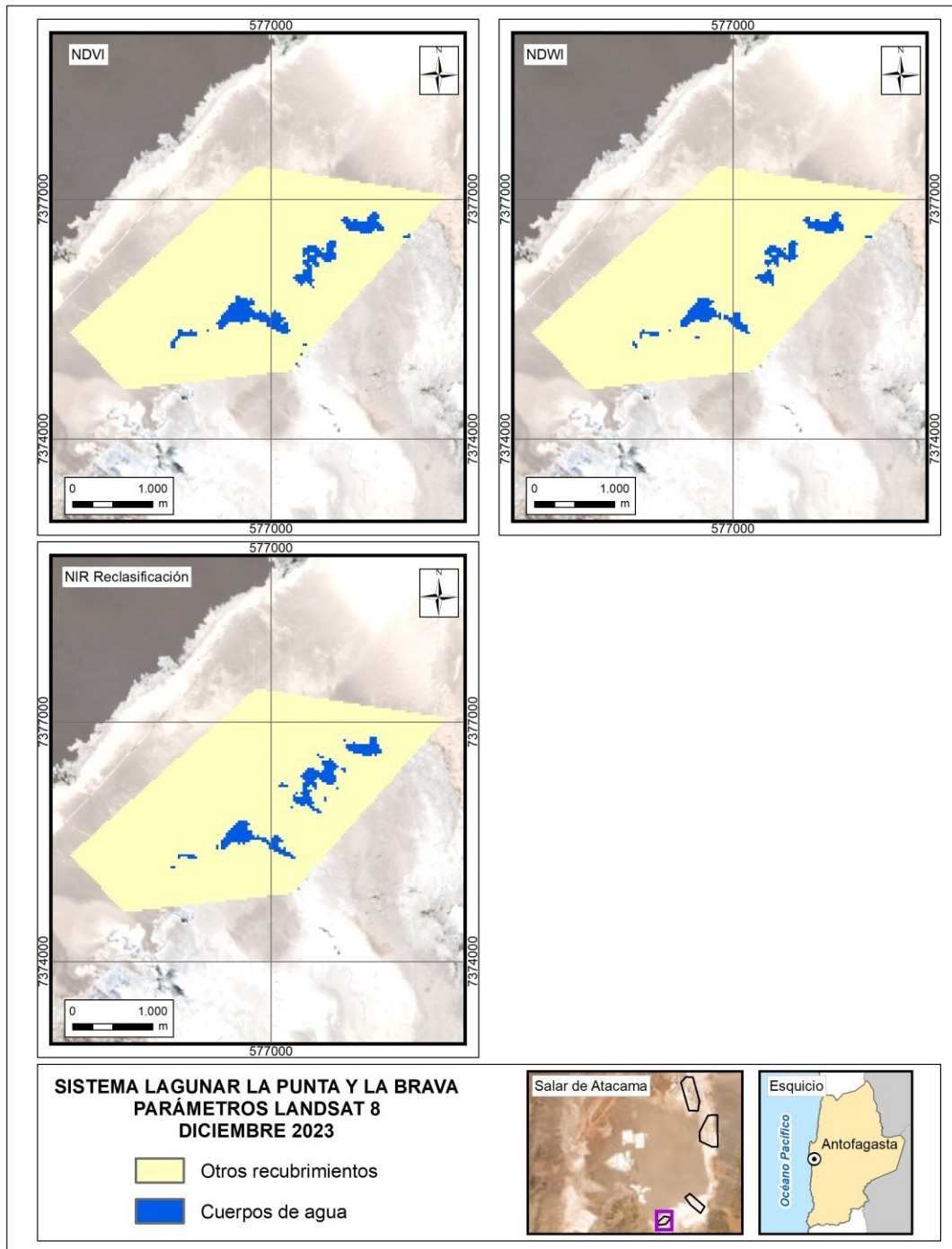
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-16. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Pleiades 1-A, invierno 2023.



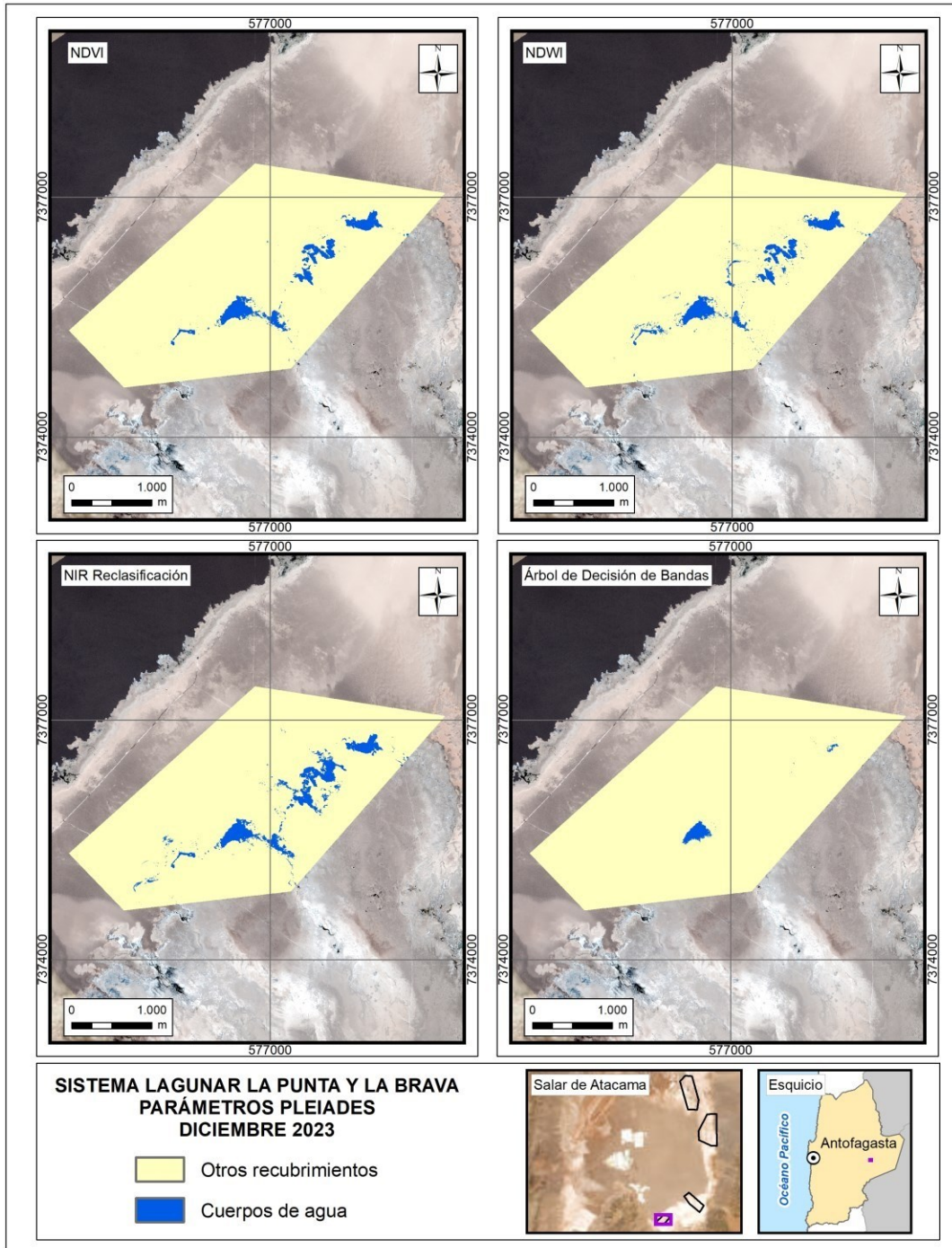
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-17. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Landsat 8, verano 2023.



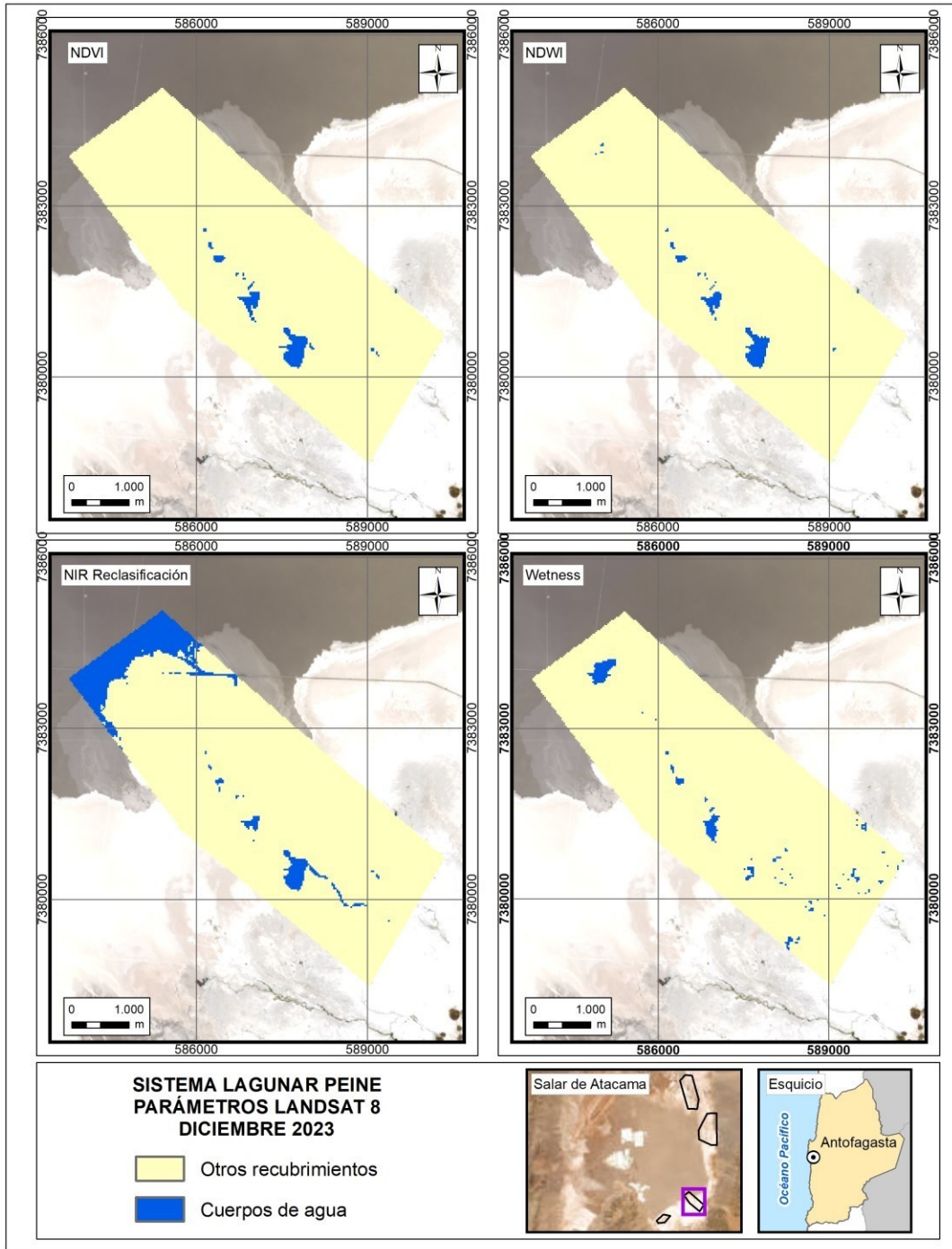
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-18. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta - La Brava, imágenes Pleiades 1-A, verano 2023.



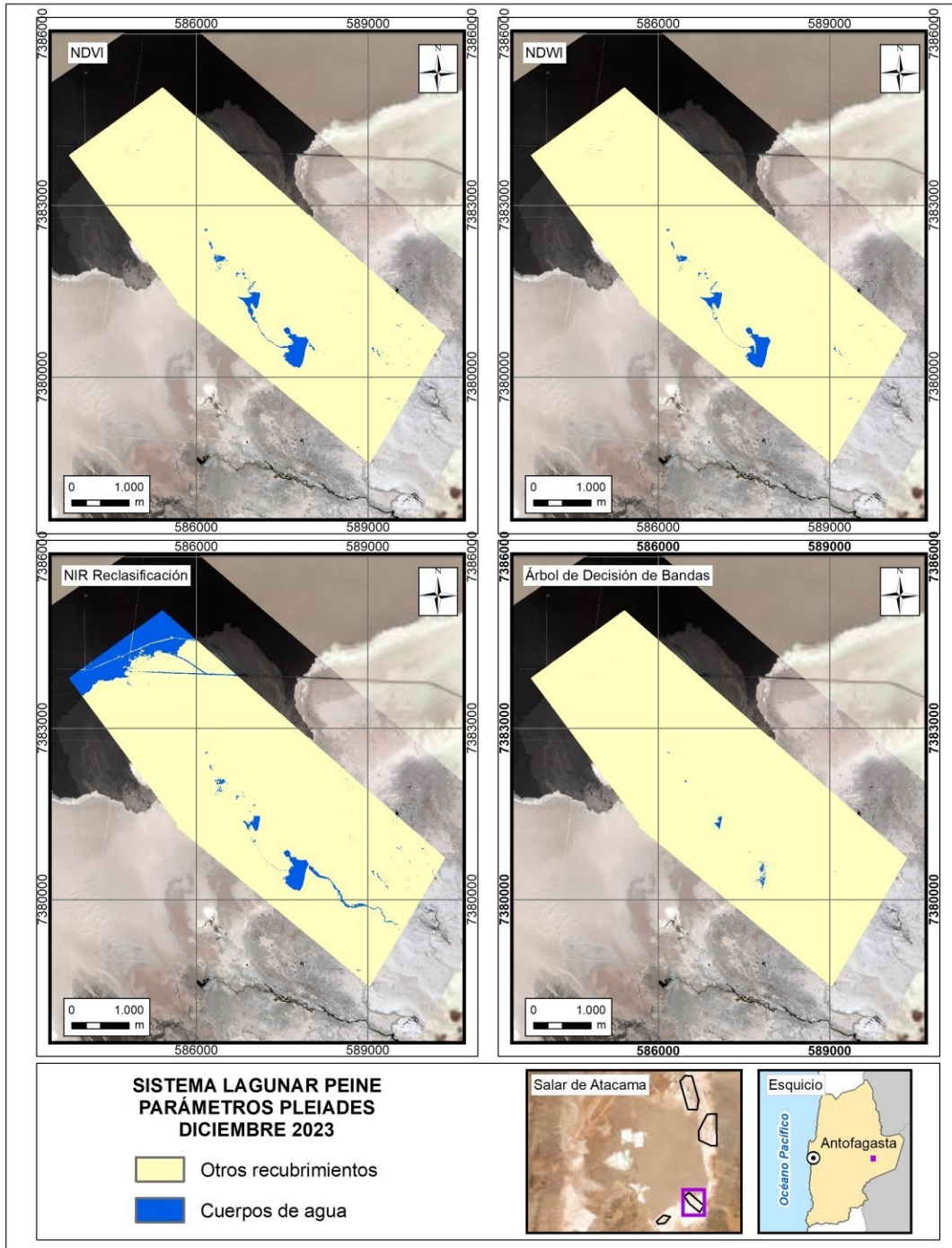
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-19. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Landsat 8, verano 2023.



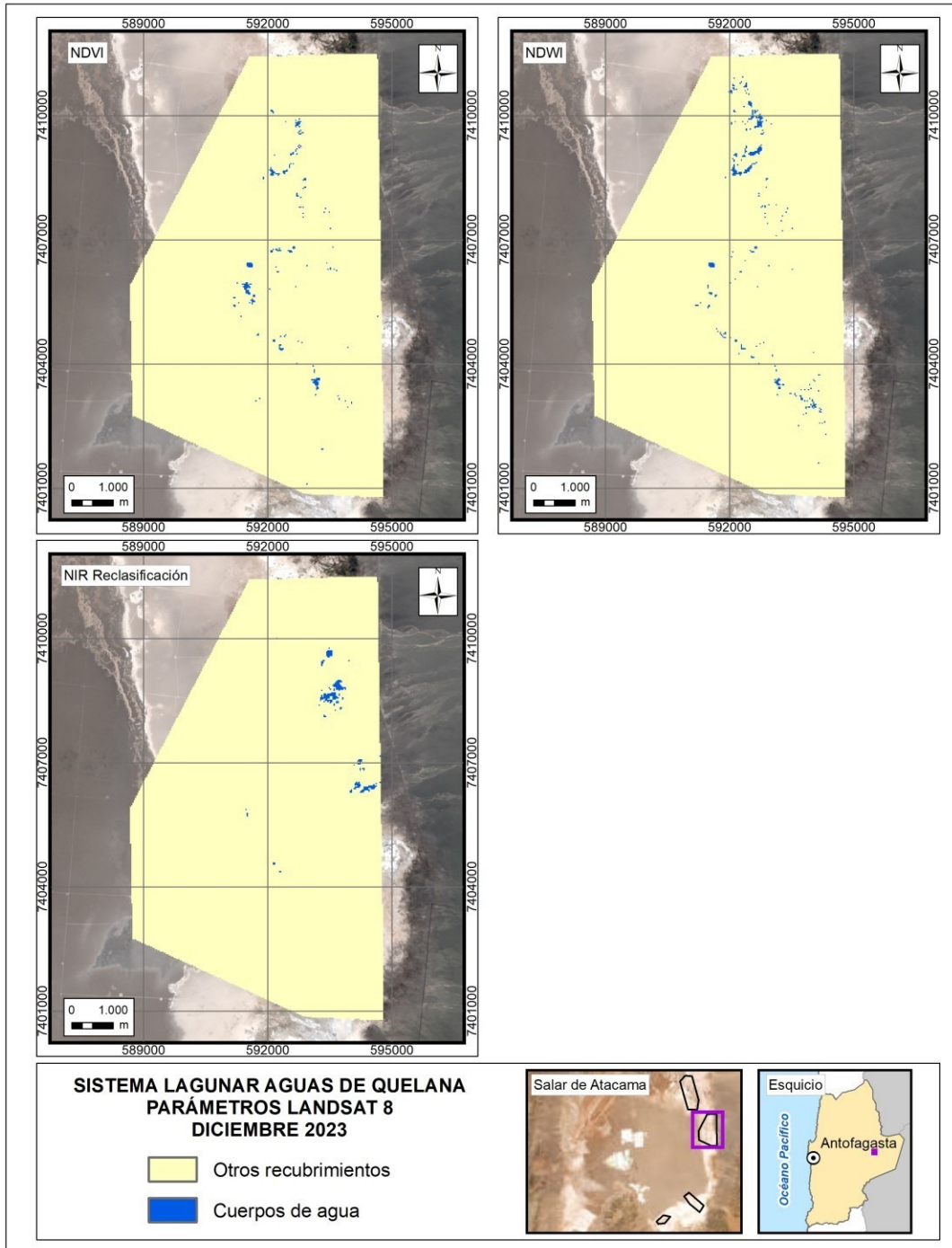
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-20. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes Pleiades 1-A, verano 2023.



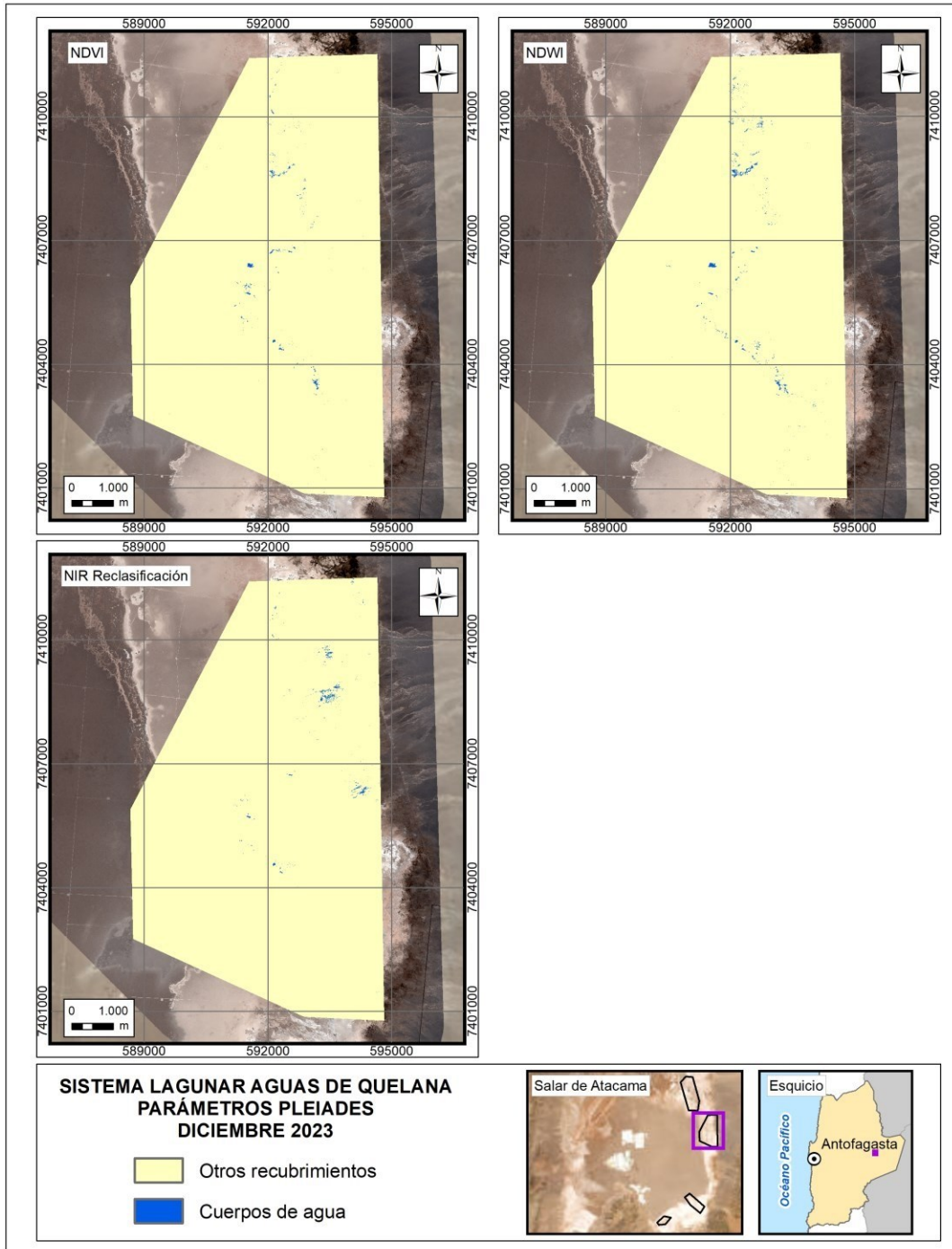
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-21. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Landsat 8, verano 2023.



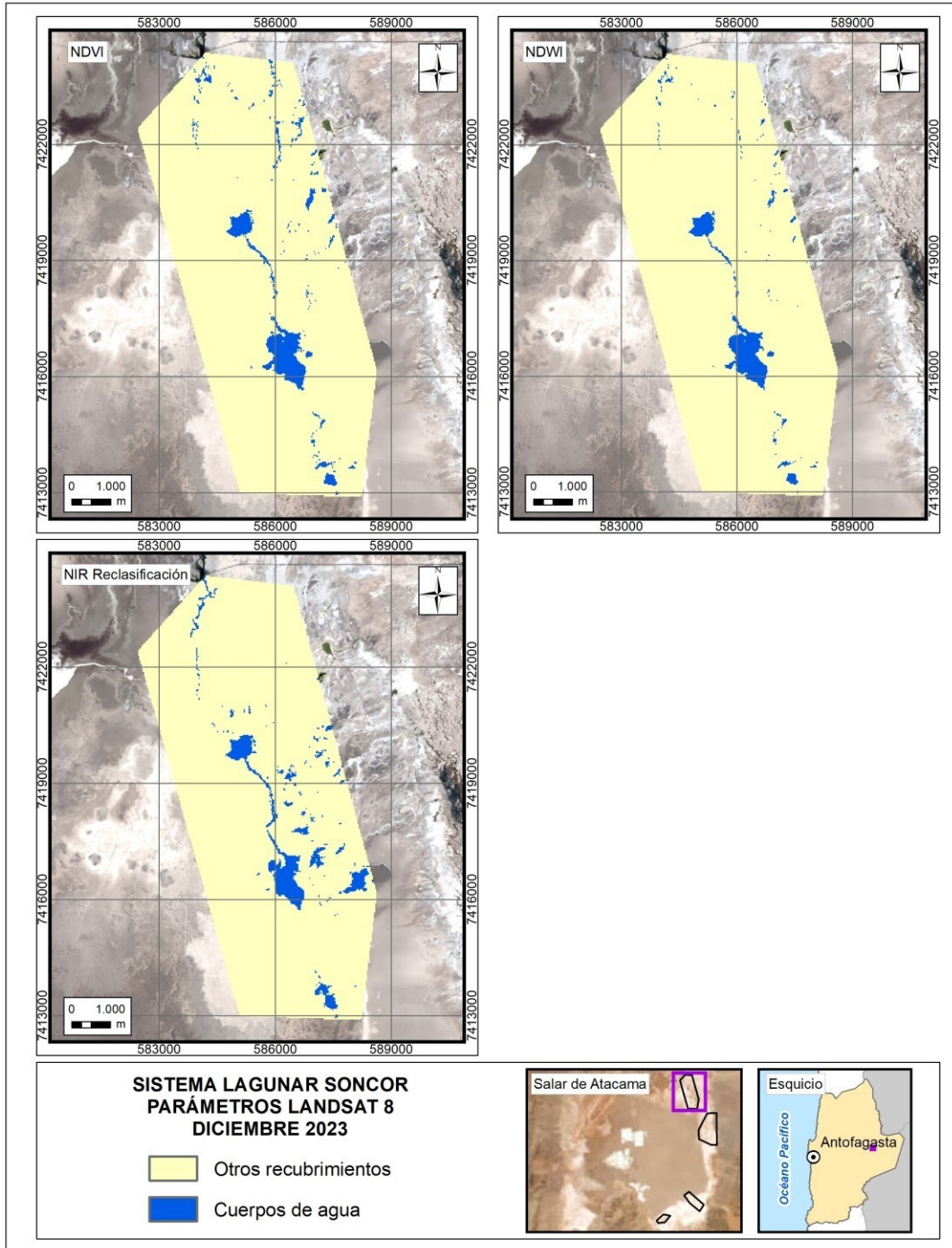
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-22. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes Pleiades 1-A, verano 2023.



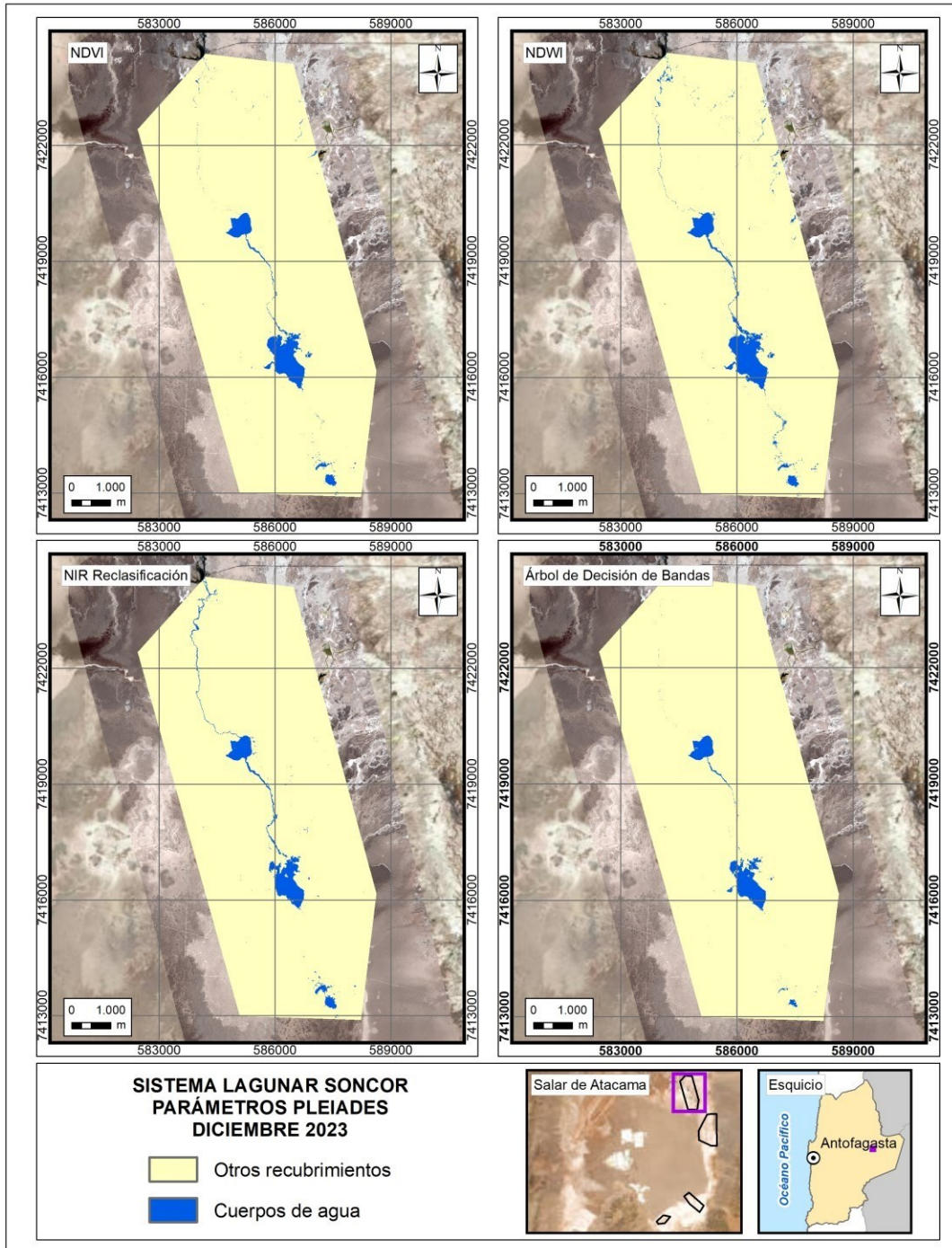
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-23. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Landsat 8, verano 2023.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-24. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes Pleiades 1-A, verano 2023.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-25. Imágenes Landsat 2016 – 2023 – Análisis NDWI.

N°	Producto/Sensor	Año	Fecha de adquisición	ID - LANDSAT	Cobertura nubosa*
1	OLI_TIRS_L1TP	2016	15-01-2016	LC08_L1TP_233076_20160115_20180528_01_T1	0,43
2	OLI_TIRS_L1TP	2016	31-01-2016	LC08_L1TP_233076_20160131_20170330_01_T1	2,32
3	OLI_TIRS_L1TP	2016	16-02-2016	LC08_L1TP_233076_20160216_20170329_01_T1	19,56*
4	OLI_TIRS_L1TP	2016	03-03-2016	LC08_L1TP_233076_20160303_20180528_01_T1	0,39
5	OLI_TIRS_L1TP	2016	19-03-2016	LC08_L1TP_233076_20160319_20170328_01_T1	0,53
6	OLI_TIRS_L1TP	2016	04-04-2016	LC08_L1TP_233076_20160404_20170327_01_T1	5,38
7	OLI_TIRS_L1TP	2016	20-04-2016	LC08_L1TP_233076_20160420_20170326_01_T1	35,03*
8	OLI_TIRS_L1TP	2016	06-05-2016	LC08_L1TP_233076_20160506_20170325_01_T1	8,72
9	OLI_TIRS_L1TP	2016	22-05-2016	LC08_L1TP_233076_20160522_20170324_01_T1	1,06
10	OLI_TIRS_L1TP	2016	07-06-2016	LC08_L1TP_233076_20160607_20170324_01_T1	0,96
11	OLI_TIRS_L1TP	2016	23-06-2016	LC08_L1TP_233076_20160623_20170323_01_T1	0,92
12	OLI_TIRS_L1TP	2016	09-07-2016	LC08_L1TP_233076_20160709_20170323_01_T1	8,66
13	OLI_TIRS_L1TP	2016	25-07-2016	LC08_L1TP_233076_20160725_20170322_01_T1	2,81
14	OLI_TIRS_L1TP	2016	10-08-2016	LC08_L1TP_233076_20160810_20170322_01_T1	1,15
15	OLI_TIRS_L1TP	2016	26-08-2016	LC08_L1TP_233076_20160826_20170322_01_T1	1,47
16	OLI_TIRS_L1TP	2016	11-09-2016	LC08_L1TP_233076_20160911_20170321_01_T1	1,1
17	OLI_TIRS_L1TP	2016	27-09-2016	LC08_L1TP_233076_20160927_20170319_01_T1	0,89
18	OLI_TIRS_L1TP	2016	13-10-2016	LC08_L1TP_233076_20161013_20170319_01_T1	1,03
19	OLI_TIRS_L1TP	2016	29-10-2016	LC08_L1TP_233076_20161029_20170319_01_T1	1,9
20	OLI_TIRS_L1TP	2016	14-11-2016	LC08_L1TP_233076_20161114_20170318_01_T1	0,82
21	OLI_TIRS_L1TP	2016	30-11-2016	LC08_L1TP_233076_20161130_20180528_01_T1	54,44*
22	OLI_TIRS_L1TP	2016	16-12-2016	LC08_L1TP_233076_20161216_20170316_01_T1	9,39
23	OLI_TIRS_L1TP	2017	01-01-2017	LC08_L1TP_233076_20170101_20170312_01_T1	0,6
24	OLI_TIRS_L1TP	2017	17-01-2017	LC08_L1TP_233076_20170117_20170311_01_T1	9,7
25	OLI_TIRS_L1TP	2017	02-02-2017	LC08_L1TP_233076_20170202_20170215_01_T1	0,51
26	OLI_TIRS_L1TP	2017	18-02-2017	LC08_L1TP_233076_20170218_20170228_01_T1	25,81*
27	OLI_TIRS_L1TP	2017	06-03-2017	LC08_L1TP_233076_20170306_20170316_01_T1	2,33
28	OLI_TIRS_L1TP	2017	22-03-2017	LC08_L1TP_233076_20170322_20170329_01_T1	0,8
29	OLI_TIRS_L1TP	2017	07-04-2017	LC08_L1TP_233076_20170407_20170414_01_T1	2,73
30	OLI_TIRS_L1TP	2017	23-04-2017	LC08_L1TP_233076_20170423_20170502_01_T1	1,51
31	OLI_TIRS_L1TP	2017	09-05-2017	LC08_L1TP_233076_20170509_20170516_01_T1	1,18
32	OLI_TIRS_L1TP	2017	25-05-2017	LC08_L1TP_233076_20170525_20170614_01_T1	81,52*

N°	Producto/Sensor	Año	Fecha de adquisición	ID - LANDSAT	Cobertura nubosa*
33	OLI_TIRS_L1TP	2017	10-06-2017	LC08_L1TP_233076_20170610_20170627_01_T1	2,72
34	OLI_TIRS_L1TP	2017	26-06-2017	LC08_L1TP_233076_20170626_20170714_01_T1	9,28
35	OLI_TIRS_L1TP	2017	12-07-2017	LC08_L1TP_233076_20170712_20170726_01_T1	3,4
36	OLI_TIRS_L1TP	2017	28-07-2017	LC08_L1TP_233076_20170728_20170810_01_T1	3,5
37	OLI_TIRS_L1TP	2017	13-08-2017	LC08_L1TP_233076_20170813_20170825_01_T1	2,71
38	OLI_TIRS_L1TP	2017	29-08-2017	LC08_L1TP_233076_20170829_20180301_01_T1	2,4
39	OLI_TIRS_L1TP	2017	14-09-2017	LC08_L1TP_233076_20170914_20170928_01_T1	1,65
40	OLI_TIRS_L1TP	2017	30-09-2017	LC08_L1TP_233076_20170930_20171013_01_T1	1,72
41	OLI_TIRS_L1TP	2017	16-10-2017	LC08_L1TP_233076_20171016_20171024_01_T1	4,24
42	OLI_TIRS_L1TP	2017	01-11-2017	LC08_L1TP_233076_20171101_20171109_01_T1	1,57
43	OLI_TIRS_L1TP	2017	17-11-2017	LC08_L1TP_233076_20171117_20171122_01_T1	1,38
44	OLI_TIRS_L1TP	2017	03-12-2017	LC08_L1TP_233076_20171203_20171207_01_T1	3,6
45	OLI_TIRS_L1TP	2017	19-12-2017	LC08_L1TP_233076_20171219_20171224_01_T1	15,63*
46	OLI_TIRS_L1TP	2018	04-01-2018	LC08_L1TP_233076_20180104_20180118_01_T1	0,89
47	OLI_TIRS_L1TP	2018	20-01-2018	LC08_L1TP_233076_20180120_20180206_01_T1	4,26
48	OLI_TIRS_L1TP	2018	05-02-2018	LC08_L1TP_233076_20180205_20180221_01_T1	21,42*
49	OLI_TIRS_L1TP	2018	21-02-2018	LC08_L1TP_233076_20180221_20180308_01_T1	0,77
50	OLI_TIRS_L1TP	2018	09-03-2018	LC08_L1TP_233076_20180309_20180320_01_T1	0,77
51	OLI_TIRS_L1TP	2018	25-03-2018	LC08_L1TP_233076_20180325_20180404_01_T1	3,02
52	OLI_TIRS_L1TP	2018	10-04-2018	LC08_L1TP_233076_20180410_20180417_01_T1	1,33
53	OLI_TIRS_L1TP	2018	26-04-2018	LC08_L1TP_233076_20180426_20180502_01_T1	42,69*
54	OLI_TIRS_L1TP	2018	12-05-2018	LC08_L1TP_233076_20180512_20180517_01_T1	1,09
55	OLI_TIRS_L1TP	2018	28-05-2018	LC08_L1TP_233076_20180528_20180605_01_T1	0,9
56	OLI_TIRS_L1TP	2018	13-06-2018	LC08_L1TP_233076_20180613_20180703_01_T1	4,85
57	OLI_TIRS_L1TP	2018	29-06-2018	LC08_L1TP_233076_20180629_20180716_01_T1	2,63
58	OLI_TIRS_L1TP	2018	15-07-2018	LC08_L1TP_233076_20180715_20180730_01_T1	2,8
59	OLI_TIRS_L1TP	2018	31-07-2018	LC08_L1TP_233076_20180731_20180814_01_T1	3,6
60	OLI_TIRS_L1TP	2018	16-08-2018	LC08_L1TP_233076_20180816_20180829_01_T1	3,68
61	OLI_TIRS_L1TP	2018	01-09-2018	LC08_L1TP_233076_20180901_20180912_01_T1	2,5
62	OLI_TIRS_L1TP	2018	17-09-2018	LC08_L1TP_233076_20180917_20180928_01_T1	1,7
63	OLI_TIRS_L1TP	2018	03-10-2018	LC08_L1TP_233076_20181003_20181010_01_T1	2,49
64	OLI_TIRS_L1TP	2018	19-10-2018	LC08_L1TP_233076_20181019_20181031_01_T1	0,88
65	OLI_TIRS_L1TP	2018	04-11-2018	LC08_L1TP_233076_20181104_20181115_01_T1	0,62
66	OLI_TIRS_L1TP	2018	20-11-2018	LC08_L1TP_233076_20181120_20181129_01_T1	1,31
67	OLI_TIRS_L1TP	2018	06-12-2018	LC08_L1TP_233076_20181206_20181211_01_T1	0,97

N°	Producto/Sensor	Año	Fecha de adquisición	ID - LANDSAT	Cobertura nubosa*
68	OLI_TIRS_L1TP	2018	22-12-2018	LC08_L1TP_233076_20181222_20181227_01_T1	0,99
69	OLI_TIRS_L1TP	2019	07-01-2019	LC08_L1TP_233076_20190107_20190130_01_T1	0,6
70	OLI_TIRS_L1TP	2019	23-01-2019	LC08_L1TP_233076_20190123_20190205_01_T1	0,24
71	OLI_TIRS_L1TP	2019	08-02-2019	LC08_L1TP_233076_20190208_20190221_01_T1	36,87*
72	OLI_TIRS_L1TP	2019	24-02-2019	LC08_L1TP_233076_20190224_20190309_01_T1	0,67
73	OLI_TIRS_L1TP	2019	12-03-2019	LC08_L1TP_233076_20190312_20190325_01_T1	0,99
74	OLI_TIRS_L1TP	2019	28-03-2019	LC08_L1TP_233076_20190328_20190404_01_T1	1,18
75	OLI_TIRS_L1TP	2019	13-04-2019	LC08_L1TP_233076_20190413_20190422_01_T1	1
76	OLI_TIRS_L1TP	2019	29-04-2019	LC08_L1TP_233076_20190429_20190508_01_T1	1,25
77	OLI_TIRS_L1TP	2019	15-05-2019	LC08_L1TP_233076_20190515_20190521_01_T1	1,03
78	OLI_TIRS_L1TP	2019	31-05-2019	LC08_L1TP_233076_20190531_20190605_01_T1	0,96
79	OLI_TIRS_L1TP	2019	16-06-2019	LC08_L1TP_233076_20190616_20190620_01_T1	31,3*
80	OLI_TIRS_L1TP	2019	02-07-2019	LC08_L1TP_233076_20190702_20190718_01_T1	38,81*
81	OLI_TIRS_L1TP	2019	18-07-2019	LC08_L1TP_233076_20190718_20190731_01_T1	1,25
82	OLI_TIRS_L1TP	2019	03-08-2019	LC08_L1TP_233076_20190803_20190819_01_T1	1,25
83	OLI_TIRS_L1TP	2019	19-08-2019	LC08_L1TP_233076_20190819_20190902_01_T1	1,09
84	OLI_TIRS_L1TP	2019	04-09-2019	LC08_L1TP_233076_20190904_20190917_01_T1	8,14
85	OLI_TIRS_L1TP	2019	20-09-2019	LC08_L1TP_233076_20190920_20190926_01_T1	2,11
86	OLI_TIRS_L1TP	2019	06-10-2019	LC08_L1TP_233076_20191006_20191018_01_T1	1,44
87	OLI_TIRS_L1TP	2019	22-10-2019	LC08_L1TP_233076_20191022_20191030_01_T1	1,01
88	OLI_TIRS_L1TP	2019	07-11-2019	LC08_L1TP_233076_20191107_20191115_01_T1	0,4
89	OLI_TIRS_L1TP	2019	23-11-2019	LC08_L1TP_233076_20191123_20191203_01_T1	2,98
90	OLI_TIRS_L1TP	2019	09-12-2019	LC08_L1TP_233076_20191209_20191217_01_T1	0,84
91	OLI_TIRS_L1TP	2019	25-12-2019	LC08_L1TP_233076_20191225_20200110_01_T1	2,11
92	OLI_TIRS_L1TP	2020	10-01-2020	LC08_L1TP_233076_20200110_20200114_01_T1	16,81*
93	OLI_TIRS_L1TP	2020	26-01-2020	LC08_L1TP_233076_20200126_20200210_01_T1	13,69*
94	OLI_TIRS_L1TP	2020	11-02-2020	LC08_L1TP_233076_20200211_20200225_01_T1	2,08
95	OLI_TIRS_L1TP	2020	27-02-2020	LC08_L1TP_233076_20200227_20200313_01_T1	0,34
96	OLI_TIRS_L1TP	2020	14-03-2020	LC08_L1TP_233076_20200314_20200325_01_T1	5,49
97	OLI_TIRS_L1TP	2020	30-03-2020	LC08_L1TP_233076_20200330_20200410_01_T1	0,71
98	OLI_TIRS_L1TP	2020	15-04-2020	LC08_L1TP_233076_20200415_20200423_01_T1	0,58
99	OLI_TIRS_L1TP	2020	01-05-2020	LC08_L1TP_233076_20200501_20200509_01_T1	0,9
100	OLI_TIRS_L1TP	2020	17-05-2020	LC08_L1TP_233076_20200517_20200527_01_T1	0,85
101	OLI_TIRS_L1TP	2020	02-06-2020	LC08_L1TP_233076_20200602_20200608_01_T1	3,88
102	OLI_TIRS_L1TP	2020	18-06-2020	LC08_L1TP_233076_20200618_20200625_01_T1	1,06

N°	Producto/Sensor	Año	Fecha de adquisición	ID - LANDSAT	Cobertura nubosa*
103	OLI_TIRS_L1TP	2020	04-07-2020	LC08_L1TP_233076_20200704_20200708_01_T1	0,75
104	OLI_TIRS_L1TP	2020	20-07-2020	LC08_L1TP_233076_20200720_20200807_01_T1	68,38*
105	OLI_TIRS_L1TP	2020	05-08-2020	LC08_L1TP_233076_20200805_20200821_01_T1	1,36
106	OLI_TIRS_L1TP	2020	21-08-2020	LC08_L1TP_233076_20200821_20200905_01_T1	2,06
107	OLI_TIRS_L1TP	2020	06-09-2020	LC08_L1TP_233076_20200906_20200918_01_T1	4,2
108	OLI_TIRS_L1TP	2020	22-09-2020	LC08_L1TP_233076_20200922_20201006_01_T1	3,59
109	OLI_TIRS_L1TP	2020	08-10-2020	LC08_L1TP_233076_20201008_20201016_01_T1	1,45
110	OLI_TIRS_L1TP	2020	24-10-2020	LC08_L1TP_233076_20201024_20201105_01_T1	1,13
111	OLI_TIRS_L1TP	2020	09-11-2020	LC08_L1TP_233076_20201109_20210317_01_T1	0,96
112	OLI_TIRS_L1TP	2020	25-11-2020	LC08_L1TP_233076_20201125_20210315_01_T1	0,4
113	OLI_TIRS_L1TP	2020	11-12-2020	LC08_L1TP_233076_20201211_20210313_01_T1	0,37
114	OLI_TIRS_L1TP	2020	27-12-2020	LC08_L1TP_233076_20201227_20210311_01_T1	18,55*
115	OLI_TIRS_L1TP	2021	12-01-2021	LC08_L1TP_233076_20210112_20210307_01_T1	3,2
116	OLI_TIRS_L1TP	2021	28-01-2021	LC08_L1TP_233076_20210128_20210305_01_T1	0,53
117	OLI_TIRS_L1TP	2021	13-02-2021	LC08_L1TP_233076_20210213_20210304_01_T1	0,58
118	OLI_TIRS_L1TP	2021	01-03-2021	LC08_L1TP_233076_20210301_20210311_01_T1	1,57
119	OLI_TIRS_L1TP	2021	17-03-2021	LC08_L1TP_233076_20210317_20210328_01_T1	0,64
120	OLI_TIRS_L1TP	2021	02-04-2021	LC08_L1TP_233076_20210402_20210409_01_T1	0,79
121	OLI_TIRS_L1TP	2021	18-04-2021	LC08_L1TP_233076_20210418_20210424_01_T1	0,86
122	OLI_TIRS_L1TP	2021	04-05-2021	LC08_L1TP_233076_20210504_20210517_01_T1	0,74
123	OLI_TIRS_L1TP	2021	20-05-2021	LC08_L1TP_233076_20210520_20210528_01_T1	5,01
124	OLI_TIRS_L1TP	2021	05-06-2021	LC08_L1TP_233076_20210605_20210614_01_T1	4,41
125	OLI_TIRS_L1TP	2021	21-06-2021	LC08_L1TP_233076_20210621_20210629_01_T1	18,57*
126	OLI_TIRS_L1TP	2021	07-07-2021	LC08_L1TP_233076_20210707_20210713_01_T1	2,37
127	OLI_TIRS_L1TP	2021	23-07-2021	LC08_L1TP_233076_20210723_20210729_01_T1	1,51
128	OLI_TIRS_L1TP	2021	08-08-2021	LC08_L1TP_233076_20210808_20210818_01_T1	2,09
129	OLI_TIRS_L1TP	2021	24-08-2021	LC08_L1TP_233076_20210824_20210831_01_T1	1,22
130	OLI_TIRS_L1TP	2021	09-09-2021	LC08_L1TP_233076_20210909_20210916_01_T1	3,8
131	OLI_TIRS_L1TP	2021	25-09-2021	LC08_L1TP_233076_20210925_20211001_01_T1	1,01
132	OLI_TIRS_L1TP	2021	11-10-2021	LC08_L1TP_233076_20211011_20211019_01_T1	0,94
133	OLI_TIRS_L1TP	2021	27-10-2021	LC08_L1TP_233076_20211027_20211104_01_T1	0,89
134	OLI_TIRS_L1TP	2021	12-11-2021	LC08_L1TP_233076_20211112_20211124_01_T1	0,59
135	OLI_TIRS_L1TP	2021	28-11-2021	LC08_L1TP_233076_20211128_20211208_01_T1	0,4
136	OLI_TIRS_L1TP	2021	14-12-2021	LC08_L1TP_233076_20211214_20211223_01_T1	3,44
137	OLI_TIRS_L1TP	2021	30-12-2021	LC08_L1TP_233076_20211230_20220106_01_T1	0,46

N°	Producto/Sensor	Año	Fecha de adquisición	ID - LANDSAT	Cobertura nubosa*
138	OLI_TIRS_L2SP	2022	15-01-2022	LC08_L2SP_233076_20220115_20220123_02_T1	17,48*
139	OLI_TIRS_L2SP	2022	31-01-2022	LC08_L2SP_233076_20220131_20220205_02_T1	3,86
140	OLI_TIRS_L2SP	2022	16-02-2022	LC08_L2SP_233076_20220216_20220223_02_T1	1,59
141	OLI_TIRS_L2SP	2022	04-03-2022	LC08_L2SP_233076_20220304_20220314_02_T1	12,73*
142	OLI_TIRS_L2SP	2022	20-03-2022	LC08_L2SP_233076_20220320_20220329_02_T1	17,14*
143	OLI_TIRS_L2SP	2022	05-04-2022	LC08_L2SP_233076_20220405_20220412_02_T1	0,83
144	OLI_TIRS_L2SP	2022	21-04-2022	LC08_L2SP_233076_20220421_20220428_02_T1	0,79
145	OLI_TIRS_L2SP	2022	07-05-2022	LC08_L2SP_233076_20220507_20220512_02_T1	11,05*
146	OLI_TIRS_L2SP	2022	23-05-2022	LC08_L2SP_233076_20220523_20220602_02_T1	1,17
147	OLI_TIRS_L2SP	2022	08-06-2022	LC08_L2SP_233076_20220608_20220616_02_T1	5,85
148	OLI_TIRS_L2SP	2022	10-07-2022	LC08_L2SP_233076_20220710_20220722_02_T1	13,28*
149	OLI_TIRS_L2SP	2022	26-07-2022	LC08_L2SP_233076_20220726_20220802_02_T1	1,12
150	OLI_TIRS_L2SP	2022	11-08-2022	LC08_L2SP_233076_20220811_20220818_02_T1	1,65
151	OLI_TIRS_L2SP	2022	27-08-2022	LC08_L2SP_233076_20220827_20220909_02_T1	1,23
152	OLI_TIRS_L2SP	2022	12-09-2022	LC08_L2SP_233076_20220912_20220922_02_T1	3,89
153	OLI_TIRS_L2SP	2022	28-09-2022	LC08_L2SP_233076_20220928_20221005_02_T1	0,99
154	OLI_TIRS_L2SP	2022	14-10-2022	LC08_L2SP_233076_20221014_20221021_02_T1	1,08
155	OLI_TIRS_L2SP	2022	30-10-2022	LC08_L2SP_233076_20221030_20221108_02_T1	1,13
156	OLI_TIRS_L2SP	2022	15-11-2022	LC08_L2SP_233076_20221115_20230113_02_T1	0,63
157	OLI_TIRS_L2SP	2022	01-12-2022	LC08_L2SP_233076_20221201_20221212_02_T1	0,58
158	OLI_TIRS_L2SP	2022	17-12-2022	LC08_L2SP_233076_20221217_20221227_02_T1	0,36
159	OLI_TIRS_L2SP	2023	02-01-2023	LC08_L2SP_233076_20230102_20230111_02_T1	14,47
160	OLI_TIRS_L2SP	2023	18-01-2023	LC08_L2SP_233076_20230118_20230131_02_T1	4,45
161	OLI_TIRS_L2SP	2023	03-02-2023	LC08_L2SP_233076_20230203_20230209_02_T1	3,42
162	OLI_TIRS_L2SP	2023	19-02-2023	LC08_L2SP_233076_20230219_20230224_02_T1	5,37
163	OLI_TIRS_L2SP	2023	07-03-2023	LC08_L2SP_233076_20230307_20230316_02_T1	0,67
164	OLI_TIRS_L2SP	2023	23-03-2023	LC08_L2SP_233076_20230323_20230404_02_T1	23,33
165	OLI_TIRS_L2SP	2023	08-04-2023	LC08_L2SP_233076_20230408_20230420_02_T1	0,84
166	OLI_TIRS_L2SP	2023	24-04-2023	LC08_L2SP_233076_20230424_20230501_02_T1	0,76
167	OLI_TIRS_L2SP	2023	10-05-2023	LC08_L2SP_233076_20230510_20230518_02_T1	0,94
168	OLI_TIRS_L2SP	2023	26-05-2023	LC08_L2SP_233076_20230526_20230603_02_T1	11,2
169	OLI_TIRS_L2SP	2023	11-06-2023	LC08_L2SP_233076_20230611_20230614_02_T1	0,91
170	OLI_TIRS_L2SP	2023	27-06-2023	LC08_L2SP_233076_20230627_20230710_02_T1	1,26
171	OLI_TIRS_L2SP	2023	13-07-2023	LC08_L2SP_233076_20230713_20230724_02_T1	1,16
172	OLI_TIRS_L2SP	2023	29-07-2023	LC08_L2SP_233076_20230729_20230805_02_T1	1,15

N°	Producto/Sensor	Año	Fecha de adquisición	ID - LANDSAT	Cobertura nubosa*
173	OLI_TIRS_L2SP	2023	14-08-2023	LC08_L2SP_233076_20230814_20230819_02_T1	1.12
174	OLI_TIRS_L2SP	2023	30-08-2023	LC08_L2SP_233076_20230830_20230906_02_T1	0.96
175	OLI_TIRS_L2SP	2023	15-09-2023	LC08_L2SP_233076_20230915_20230925_02_T1	1.39
176	OLI_TIRS_L2SP	2023	01-10-2023	LC08_L2SP_233076_20231001_20231011_02_T1	0.99
177	OLI_TIRS_L2SP	2023	17-10-2023	LC08_L2SP_233076_20231017_20231103_02_T1	9.35
178	OLI_TIRS_L2SP	2023	02-11-2023	LC08_L2SP_233076_20231102_20231109_02_T1	1.08
179	OLI_TIRS_L2SP	2023	18-11-2023	LC08_L2SP_233076_20231118_20231122_02_T1	1.03
180	OLI_TIRS_L2SP	2023	04-12-2023	LC08_L2SP_233076_20231204_20231209_02_T1	0.73
181	OLI_TIRS_L2SP	2023	20-12-2023	LC08_L2SP_233076_20231220_20240103_02_T1	0.34

*Las coberturas nubosas mayores al 10% fueron analizadas según el área de corte, y consideradas en la medida que no afectaran la metodología de análisis; sus resultados se analizan por la imagen de salida, pero podría no considerarse en la medida que se presente como un valor extremo en la serie de datos.