

Anexo C-1

Superficie Cubierta por Lagunas



INFORME ANUAL N°5

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



Región de Antofagasta

Marzo de 2021

ÍNDICE

1	RESUMEN	8
2	INTRODUCCIÓN	11
3	OBJETIVOS.....	14
4	MATERIALES Y MÉTODOS	15
4.1	Descripción del área de estudio	15
4.2	Parámetros utilizados para caracterizar el estado y seguimiento de los cuerpos de agua	17
4.3	Ubicación de los puntos de muestreo para validación de cuerpos de agua	17
4.4	Materiales y equipos utilizados.....	20
4.5	Metodología de muestreo y/o medición.....	20
4.6	Metodología de análisis de las imágenes satelitales para delimitación de cuerpos de agua	21
4.6.1	Imágenes de alta resolución – Pleiades-1A	21
4.6.2	Imagen de resolución media – LANDSAT 8.....	24
4.6.3	Procesamiento de las imágenes satelitales	25
4.6.4	Descripción del Modelo de Clasificación Supervisada de cuerpos de agua	26
4.6.5	Parámetros espectrales del modelo de clasificación.....	27
4.6.6	Umrales y validación del modelo de clasificación	29
4.6.7	Depuración cartográfica de cuerpos de agua.....	31
4.7	Análisis comparativo para seguimiento de la cobertura de cuerpos de agua	32
4.8	Fechas de medición.....	33
5	RESULTADOS	33
5.1	Validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua	33
5.2	Resultados Superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar	38
5.2.1	La Punta y La Brava	40
5.2.2	Peine.....	47
5.2.3	Aguas de Quelana	54
5.2.4	Soncor.....	61
5.3	Límites considerados en el seguimiento de los cuerpos de agua	68
6	DISCUSION	68
6.1	Análisis de la validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua	68

6.2	Análisis de comparación con registros históricos de línea de base	70
6.2.1	Sistema Lagunas La Punta y La Brava	73
6.2.2	Sistema Lagunas Peine	78
6.2.3	Sistema Aguas de Quelana	84
6.2.4	Sistema Soncor	90
7	CONCLUSIONES	95
8	REFERENCIAS	99
9	ANEXOS	103
	ANEXO 9-1. Distribución de puntos de validación para imágenes LANDSAT 8 y PLEIADES 1-A, SECTOR NORTE. Agosto 2020.	103
	ANEXO 9-2. Distribución de puntos de validación para imágenes LANDSAT 8 y PLEIADES 1-A, SECTOR NORTE. Diciembre 2020.	104
	ANEXO 9-3. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes LANDSAT 8 y PLEIADES 1-A, SECTOR SUR. Agosto 2020.	105
	ANEXO 9-4. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes LANDSAT 8 y PLEIADES 1-A, SECTOR SUR. Diciembre 2020.	106
	ANEXO 9-5. Coordenadas de puntos de validación en terreno	107
	ANEXO 9-6. Cuadro comparativo de diferencias implementadas en el estudio actual respecto a la línea de base (Adenda 5 RWL, 2015).....	107
	ANEXO 9-7. Metadata de Imágenes de alta resolución – Pleiades 1A.....	108
	ANEXO 9-8. Metadata de Imágenes de media resolución – Landsat	108
	ANEXO 9-9. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes LANDSAT 8, invierno 2020.....	109
	ANEXO 9-10. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes PLEIADES 1A, invierno 2020.	110
	ANEXO 9-11. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes LANDSAT 8, invierno 2020.	111
	ANEXO 9-12. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes PLEIADES 1A, invierno 2020.	112
	ANEXO 9-13. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes LANDSAT 8, invierno 2020.....	113
	ANEXO 9-14. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes PLEIADES 1A, invierno 2020.	114
	ANEXO 9-15. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes LANDSAT 8, invierno 2020.	115
	ANEXO 9-16. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes PLEIADES 1A, invierno 2020.	116

ANEXO 9-17. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes LANDSAT 8, verano 2020.	117
ANEXO 9-18. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes PLEIADES 1A, verano 2020.	118
ANEXO 9-19. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes LANDSAT 8, verano 2020.	119
ANEXO 9-20. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes PLEIADES 1A, verano 2020.	120
ANEXO 9-21. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes LANDSAT 8, verano 2020.	121
ANEXO 9-22. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes PLEIADES 1A, verano 2020.	122
ANEXO 9-23. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes LANDSAT 8, verano 2020.	123
ANEXO 9-24. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes PLEIADES 1A, verano 2020.	124
ANEXO 9-25. Carta N°78/2020 de la Comunidad de Peine.	125
ANEXO 9-26. Carta CONAF que indica permanencia de cierre de ASP Región de Antofagasta.	127
ANEXO 9-27. Imágenes Landsat 2019 – 2020 – Análisis NDWI.	128

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.	16
Figura N°4-2. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades-1A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama, invierno 2020.	22
Figura N°4-3. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades-1A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama verano 2020.	23
Figura N°4-4. Imagen Landsat 8 correspondiente al cuadrante que incluye el área de estudio en invierno 2020 (izquierda – RGB) y verano 2020 (derecha - RGB).	24
Figura N°4-5. Modelo conceptual de árbol de decisiones usado para la clasificación supervisada de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales.	26
Figura N°4-6. Diagrama del proceso de transformación y depuración de imágenes formato de cobertura continua (<i>raster</i>) a polígonos (<i>shape</i>).	32
Figura N°5-1. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar La Punta y La Brava.	40
Figura N°5-2. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades-1A y Landsat 8 en el sistema lagunar La Punta y La Brava, agosto – diciembre 2020.	42

Figura N°5-3. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector La Punta y La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1A.	43
Figura N°5-4. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 - 2019 y 2020, sector La Punta y La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.	44
Figura N°5-5. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 - 2019 y 2020, sector La Punta y La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1A.	45
Figura N°5-6. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017–2018 – 2019 y 2020, sector La Punta y La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.	46
Figura N°5-7. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar Peine.	47
Figura N°5-8. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Peine, agosto – diciembre 2020.	49
Figura N°5-9. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1A.	50
Figura N°5-10. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.	51
Figura N°5-11. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1A.	52
Figura N°5-12. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.	53
Figura N°5-13. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua sistema lagunar Aguas de Quelana.	54
Figura N°5-14. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Aguas de Quelana, agosto – diciembre 2020.	56
Figura N°5-15. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Pleiades 1A.	57
Figura N°5-16. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 –2018 – 2019 y 2020, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Landsat 8.	58
Figura N°5-17. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Pleiades 1A.	59
Figura N°5-18. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Landsat 8.	60
Figura N°5-19. Registros históricos y superficie de los cuerpos de agua, sistema lagunar Soncor.	61
Figura N°5-20. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Soncor, agosto – diciembre 2020.	63
Figura N°5-21. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1A.	64
Figura N°5-22. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8.	65
Figura N°5-23. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1A.	66
Figura N°5-24. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8.	67

Figura N° 6-1. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector La Punta y la Brava.....	74
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 y la Brava.	75
Figura N° 6-3. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector La Punta y la Brava.....	76
Figura N° 6-4. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar La Punta y La Brava.	77
Figura N° 6-5. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine.....	79
Figura N° 6-6. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Peine.....	81
Figura N° 6-7. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine.....	82
Figura N° 6-8. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Peine.....	83
Figura N° 6-9. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Aguas de Quelana.	85
Figura N° 6-10. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Aguas de Quelana.....	86
Figura N° 6-11. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Aguas de Quelana.	89
Figura N° 6-12. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor.....	91
Figura N° 6-13. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Soncor.	92
Figura N° 6-14. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor.....	93
Figura N° 6-15. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Soncor.	94

TABLAS

Tabla N°2-1. Resumen de Componentes y Variables	12
Tabla N°2-2. Identificación de Instituciones y/o equipos de trabajo encargada de realizar el muestreo, medición, análisis y/o control.	13
Tabla N°4-1. Número de puntos de monitoreo catastrados en la campaña de invierno 2020, para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades-1A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama.....	19
Tabla N°4-2. Número de puntos de muestreo catastrados en la campaña de verano 2020, para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades-1A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama.....	19

Tabla N°4-3. Características técnicas del sensor Pleiades-1A.....	21
Tabla N°4-4. Características técnicas de las bandas espectrales de la imagen Landsat 8	24
Tabla N°4-5. Valores de los umbrales de clasificación de los parámetros espectrales usados, según Pleiades 1A y Landsat 8, para la delimitación de cuerpos de agua en los sistemas lagunares del Salar de Atacama, agosto y diciembre de 2020.	29
Tabla N°5-1. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1A: Matriz de confusión y el índice <i>Kappa</i> por sistema lagunar. Agosto, 2020.	34
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, 2020.	35
Tabla N°5-3. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1A: Matriz de confusión y el índice <i>Kappa</i> por sistema lagunar. Diciembre de 2020.	36
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 2020.	37
Tabla N°5-5. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales Pleiades 1A y datos obtenidos en el monitoreo 2020 (invierno y verano), respecto de los registros de línea de base (Adenda 5 RWL, 2015).	39
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 2020 (invierno y verano), respecto de los registros de línea de base (Adenda 5 RWL, 2015).	39
Tabla N°6-1. Consolidado de índices <i>Kappa</i> de validación del modelo de clasificación para imágenes Pleiades 1-A y Landsat 8.	69
Tabla N°7-1. Superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales (Pleiades 1A y Landsat 8) y datos obtenidos en el monitoreo 2020 (invierno y verano), respecto de los registros de línea de base e históricos (Adenda 5 RWL, 2015).....	95

1 RESUMEN

Este análisis 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, 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 y La Brava, (2) Peine, (3) Aguas de Quelana y (4) Soncor. Para tal fin, se utilizan imágenes de alta resolución del sensor Pleiades 1A y de mediana resolución de acceso público del sensor Landsat 8, obtenidas en invierno y verano de 2020.

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 2020 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 las campañas 2020, se presentaron restricciones de acceso a los subsectores de estudio, tanto por las medidas sanitarias en el marco de la Pandemia COVID – 19; como también, parte de las medidas de acceso limitado a áreas con poblaciones de flamenco en fase reproductiva informado por las comunidades atacameñas. Para invierno 2020 (agosto), solo fue posible acceder y realizar validación en terreno y vuelo dron - UVA en los sectores de la Punta - La Brava y Peine, ya que el sector norte conformado por los sistemas Soncor y Aguas de Quelana, y debido a que forman parte de la Reserva Nacional Los Flamencos, fueron parte del protocolo de cierre de reservas que integran el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), como parte de las medidas de prevención de la pandemia. En la campaña verano 2020 (diciembre) solo fue posible realizar validación en terreno y vuelo dron - UVA en el sector La Punta y La Brava, dado la restricción puesta por la Comunidad de Peine, limitando el acceso a áreas con poblaciones de flamencos en fase reproductiva (sector lagunas de Peine). Se adjunta **ANEXO 9-25. Carta N°78/2020 de la Comunidad de Peine**. Para el sector norte, Soncor y Aguas de Quelana persistía a la fecha del monitoreo de invierno 2020, el protocolo de cierre de reservas que conforman el SNASPE como parte de las medidas sanitarias de control de la pandemia (**ANEXO 9-26. Carta CONAF que indica permanencia de cierre de ASP Región de Antofagasta.**).

Los valores de ajuste se obtuvieron mediante el índice *Kappa*¹, este índice tuvo una variación entre 0,64 y 0,98 para imágenes de alta resolución y desde 0,56 y 0,80 para imágenes de resolución media en agosto de 2020. Respecto de diciembre de 2020, este índice tuvo una variación entre 0,37 y 0,94 para imágenes de alta resolución y desde 0,44 a 0,75 para imágenes de media resolución. 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 *aceptable a casi perfecto*¹. 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 fointerpretación visual (sectores Soncor y Peine). Los valores más bajos en el ajuste del modelo se reportan principalmente en sectores que muestran un gradiente de vegetación en los bordes lagunares, el cual conduce a una estimación menos precisa de los límites de la superficie de agua, esto ocurre especialmente en invierno o en aumentos de las superficies inundadas, periodos en que la humedad del suelo alcanza mayores superficies combinándose con otros recubrimientos (sectores Aguas de Quelana y La Punta – La Brava).

Complementariamente se aplicó el índice de *precisión global*², los valores tuvieron una variación entre 83% y 99% para imágenes de alta resolución Pleiades-1A, y desde 79% y 92% para imágenes de resolución media Landsat 8 en agosto de 2020. Respecto de diciembre de 2020, la precisión global del modelo tuvo una variación entre 85% y 97% para imágenes de alta resolución Pleiades-1A, y desde 82% a 95% para imágenes de resolución media Landsat 8. Valores promedio sobre el 80% muestran una alta concordancia de lo observado con el resultado del método de clasificación supervisada, en todos los sectores y para ambas temporadas (agosto 2020, diciembre 2020).

Las superficies lagunares estimadas en este monitoreo desde imágenes de alta resolución, en invierno de 2020 correspondieron a: (1) 51,4 ha en La Punta y La Brava, (2) 54,2 ha en Peine, (3) 17,2 ha en Aguas de Quelana, y (4) 255,3 ha Soncor; y para verano de 2020 las superficies son: (1) 28,5 ha en La Punta y La Brava, (2) 73,5 ha en Peine, (3) 8,5 ha en Aguas de Quelana y (4) 168,9 ha Soncor.

Las superficies lagunares estimadas en este monitoreo desde imágenes de media resolución, en invierno de 2020 correspondieron a: (1) 60,0 ha en La Punta y La Brava, (2) 105,4 ha en Peine, (3) 18,7 ha en Aguas de Quelana, y (4) 331,6 ha Soncor; y para verano de 2020 las superficies son: (1) 36,1 ha en La Punta y La Brava, (2) 83,0 ha en Peine, (3) 8,5 ha en Aguas de Quelana y (4) 225,5 ha Soncor.

En relación al análisis comparativo entre las imágenes satelitales, la correlación entre las superficies calculadas desde alta resolución (Pleiades 1A) y desde media resolución (Landsat), y según

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 El índice de Precisión Global (*Overall Accuracy*) describe la exactitud de los aciertos en la clasificación supervisada expresada en porcentaje (0 a 100%). Se interpreta como la proporción de píxeles de una imagen clasificados correctamente en concordancia con los datos de terreno, p.ej. todos los píxeles identificados como “agua” en la imagen, también corresponden a “agua” en terreno, en este caso de un 100% de coincidencia es una clasificación perfecta.

el coeficiente de correlación de Pearson, muestran que para los sectores La Punta-La Brava, Peine y Soncor, las variables tienen una *relación positiva*, con una correlación entre *moderada y baja*; mientras que los valores p indican que existe *evidencia no concluyente* sobre la significancia estadística de la asociación entre las variables Pleiades y Landsat; por otra parte, para el sector Aguas de Quelana, las variables muestran una *relación positiva y alta correlación*, con un valor p que indica que existe una *significancia estadística* en la asociación. Esto señala, que en la mayoría de los sectores, que existe un relación moderada entre los resultados provenientes de AR y Landsat, diferencias que 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 de los recubrimientos (por la mejora del contraste y respuesta espectral que otorga las imágenes de alta resolución), lo que produce diferencias en la magnitud de los valores, pero relacionándose en sentido directo (a valores altos de una le corresponden valores altos de la otra e igualmente con los valores bajos).

En relación con la evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 (1972 – 2014) y serie complementaria (2016 – 2020)), en todos los sectores de estudio se observa que la máxima extensión de la superficie de los cuerpos de agua se 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, en este sector los veranos alcanzan bajas que pueden llegar a una reducción de un 98%. El sector Soncor puede presentar diferencias entre las superficies de los periodos de invierno y verano que puede alcanzar hasta el 60%. En general, se observa una tendencia al descenso de las superficies en la condición de invierno, siendo más destacada en Sistema La Punta – La Brava, cuyas diferencias entre superficies de inviernos y veranos ha disminuido y se ven acortadas hasta la fecha actual.

Vale destacar, que las variaciones de las superficies de los cuerpos de agua observadas en la serie complemento (2016 -2020), están en los rangos mínimos y máximos registrados en la serie NDWI-Landsat histórica (1972 – 2014).

En relación con la evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) y las superficies históricas serie Adenda 5 (1972 – 2014) y serie complementaria (2016 – 2020), las superficies calculadas con imágenes de media resolución Landsat durante el monitoreo 2016 a 2020, 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, considerando las superficies históricas 1972 – 2014 y 2016 - 2020.

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 y análisis visual, 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.

En ese sentido, la validación en terreno implementada en el marco del PSAH ha sido fundamental, como por ejemplo, para mejorar la delimitación en el subsector Laguna Interna, proceso que no ha sido

considerado en la metodología NDWI-Landsat histórica, pudiendo implicar en este caso una subestimación del área total en comparación con la metodología del PSAH. Para el caso de Aguas de Quelana, la metodología aplicada en el marco del PSAH, permite la inclusión de áreas de vegetación inundada a la superficie total de ocupación de las lagunas, señalados en los índices NDVI y por la banda NIR, lo que explica la inclusión de áreas de transición que no son detectadas por la metodología NDWI-Landsat, lo que se traduce en las diferencias en las superficies de ambos métodos.

En relación a la variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución, la variación de las superficies semestrales de alta resolución del PSAH para el sector La Punta – La Brava en relación con las superficies históricas AR (Adenda 5 RWL, 2015), muestran que las superficies semestrales, se presentan sobre los históricos, a excepción del mes de diciembre de 2020. En general, las variaciones estacionales con inviernos de mayor área de ocupación lagunar y veranos con menor superficie lagunar, puede observarse tanto en las series de las imágenes de alta resolución como las de media resolución, pero en la serie de alta resolución no se observa una diferencia constante entre inviernos y veranos, siendo más amplia o más acotada, sin un patrón fijo.

La variación de las superficies semestrales de alta resolución del PSAH para el sector Peine, se encuentran sobre los mínimos históricos de AR, con una variación estacional no influenciada por la evaporación, donde no existe una correlación clara entre la precipitación registrada y las variaciones en el área de ocupación de los cuerpos de agua. En el sector Aguas de Quelana, las superficies en alta resolución del PSAH se encuentran bajo el mínimo histórico en diciembre 2020 y sobre el mínimo en el resto de los registros; las variaciones intranuales e interanuales verificarían a la evaporación como un factor más relevante que las precipitaciones. Finalmente, el sector Soncor muestra registros de superficies semestrales en alta resolución sobre los mínimos históricos a excepción del registro de diciembre 2020; con variabilidad estacional entre registros.

Dentro de la comparativa anterior, es importante destacar que las superficies históricas en AR (línea base) han sido determinadas en meses distintos (enero – abril) a los reportados semestralmente en el PSAH (agosto y diciembre), aspecto importante a considerar, dada la variabilidad intranual mostrada.

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 pixel máximo de 4 metros, es decir de alta resolución, utilizando el sensor Pleiades 1A (2 m) y de mediana resolución de acceso público del sensor Landsat 8 (30 m), obtenidas en **agosto y diciembre de 2020**.

Este informe corresponde al monitoreo y seguimiento ambiental de las “Superficies cubierta por lagunas”, mediciones de invierno y verano de 2020, durante la Fase de Operación, período establecido, en Anexo 3 - Adenda 5, 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 metodología “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.

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 pixel 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</p>

³ El índice modificado MNDWI es más 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.

Componente Ambiental	Monitoreo	Variable o Parámetro	Metodología
			fecha más próxima a las de las imágenes de alta definición.

Para el logro del objetivo propuesto inicialmente se implementó un muestreo para revalidación estacional, correspondientes 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 a la metodología “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 encargada de realizar el muestreo, medición, análisis y/o control.

Empresa / Equipo de Trabajo	Actividades realizadas	Encargado
Cedrem Consultores	<u>Medición:</u> Validación estacional de puntos en terreno y levantamiento de puntos de posicionamiento en tiempo real de alta precisión.	<u>Especialistas en terreno:</u> Tomás Lizama Michael Venegas Pedro Pablo Barahona David Avaca
	<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> Tomás Lizama Jessica Labarca
Apogeos	<u>Trabajo en gabinete:</u> Correcciones y adquisición de imágenes satelitales.	Lorena Bustamante (Especialista)

Fuente: Cedrem Consultores

El presente informe describe los alcances metodológicos, los resultados y discusión para el estudio, partiendo con el análisis y validación del modelo de clasificación supervisada de los cuerpos de agua, el cual fue implementado en base a imágenes de alta resolución, Pleiades-1A, y de media resolución, Landsat 8, obtenidas durante agosto y diciembre de 2020. Posteriormente, se detallan los resultados de la cobertura determinada para los cuerpos de agua por sistema lagunar, desde imágenes de alta resolución, comparándolos con los registros históricos de línea de base y con la superficie determinada a partir de Landsat 8, con el fin de realizar un análisis comparativo entre los monitoreos de invierno 2020 y verano 2020, con los resultados obtenidos desde el primer año de monitoreo (2016) y con los históricos de línea de base.

3 OBJETIVOS

El objetivo general es monitorear la cobertura o superficie de las lagunas o de los cuerpos de agua, con el fin de hacer el seguimiento a la evolución de las mismas y detectar cambios en el tamaño de éstas.

Como ya se ha mencionado, la medición se realiza a través de imágenes satelitales de alta resolución y de mediana resolución Landsat, cuyo seguimiento se realiza con los registros de línea de base, en cuatro sistemas lagunares del Salar de Atacama, considerando como base los alcances y procedimientos comprometidos en el PSAH.

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 a la metodología “Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (NDWI por su sigla en inglés), en cuatro sistemas lagunares del Salar de Atacama (La Punta y 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 línea de base del componente, y establecidos por el PSAH (Adenda 5 RWL, 2015), 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 8.⁶

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.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del área de estudio

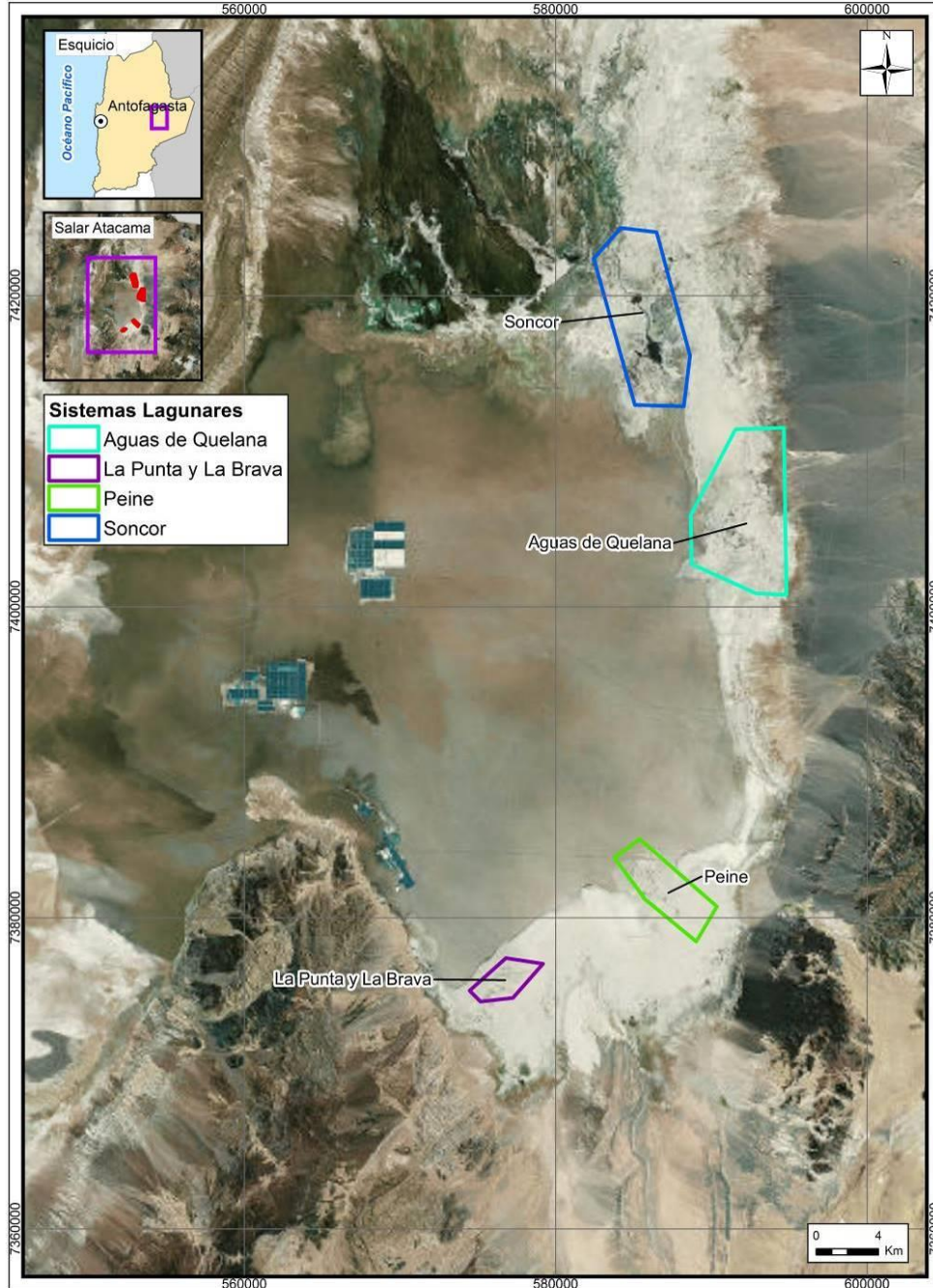
El área de estudio se sitúa en el Salar de Atacama, en la comuna de San Pedro de Atacama, Provincia de El Loa, extremo oriente de la II Región de Antofagasta y se encuentra a una altura geográfica aproximada de 2.300 m.s.n.m

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, 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 y 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%).
- 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 cuatro 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 subsuperficialmente 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, 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 a que *“...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-1A 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 se realiza en base a la imagen de alta resolución (Pleiades -1A, 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 es revalidar el recubrimiento de suelo, mediante réplicas de los puntos levantados desde el primer año de monitoreo, en agosto y diciembre de 2016, 2017, 2018 y 2019, 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 colección de datos en **invierno 2020** se realizó en una campaña, la que se llevó a cabo entre el **19 y el 22 de agosto de 2020**. En forma paralela, se realizó la captura de las imágenes satelitales de alta resolución para todos los sectores (Pleiades-1A) y se descargó la imagen de media resolución (Landsat 8). Complementariamente, se utilizaron imágenes de dron DJI modelo *Mavic Pro* con cámara de 12 mega píxeles en los sectores de La Punta y La Brava y Peine. El sector norte conformado por los

sistemas Soncor y Aguas de Quelana, y como se señala anteriormente, fueron parte del protocolo de cierre de reservas que integran el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), por lo que no se realiza recorrido pedestre ni captura de imagen desde dron – UVA; por lo tanto, los análisis de validación supervisada se basan en la imagen satelital de base (fotointerpretación).

La colección de datos para **verano 2020** se realizó en una campaña con visita sólo al sector La Punta y La Brava, la que se llevó a cabo el día **19 de diciembre de 2020**. Se presentaron medidas de restricción de movilidad que no permitieron el traslado y acceso al sector Peine (lagunas Salada, Saladita e Interna), reduciendo las posibilidades de seguimiento a acciones remotas (fotointerpretación en la imagen de alta resolución y en imagen dron – UVA en La Punta y La Brava). Esta restricción, fue puesta por la Comunidad de Peine, limitando el acceso a áreas con poblaciones de flamencos en fase reproductiva (sector lagunas de Peine), y bajo estas condiciones tampoco se realiza toma complementaria de imagen desde UAV – dron en este sector. En **Anexo Área de Lagunas** se adjunta Carta N°78/2020 de la Comunidad de Peine.

En forma paralela, se realizó la captura de las imágenes satelitales de alta resolución para todos los sectores (Pleiades-1A) y ocho días antes de la campaña se descargó la imagen de media resolución (Landsat 8). Complementariamente, se utilizaron imágenes de dron DJI modelo *Mavic Pro* con cámara de 12 mega pixeles en el sector de La Punta y La Brava. Para el sector norte, Soncor y Aguas de Quelana, persistía a la fecha el protocolo de cierre preventivo de reservas que conforman el SNASPE, por lo que las acciones de revalidación se realizan mediante el método fotointerpretativo de la imagen satelital.

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 en la línea de base del Proyecto para el componente (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 presenta 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-1A 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 aquello 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 2020, para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades-1A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama.

SISTEMA LAGUNAR	CLASIFICACIÓN POR RECUBRIMIENTO DE SUELO	PUNTOS DE VALIDACIÓN			
		PLEIADES 1A		LANDSAT 8	
		Terreno - <i>in situ</i> **	Fotointerpretación*	Terreno - <i>in situ</i> **	Fotointerpretación*
La Punta y La Brava	Otros recubrimientos	170	-	55	-
	Cuerpos de agua	135	-	42	-
	Total sistema lagunar	305	-	97	-
Peine	Otros recubrimientos	59	-	58	-
	Cuerpos de agua	132	-	124	-
	Total sistema lagunar	191	-	182	-
Aguas de Quelana	Otros recubrimientos	-	59	-	59
	Cuerpos de agua	-	25	-	25
	Total sistema lagunar	-	84	-	84
Soncor	Otros recubrimientos	-	125	-	115
	Cuerpos de agua	-	131	-	118
	Total sistema lagunar	-	256	-	233
TOTAL GENERAL			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 2020, para validación del modelo de clasificación de cobertura de cuerpos de agua a partir de imágenes Pleiades-1A y Landsat 8 en los sistemas lagunares del Salar de Atacama.

SISTEMA LAGUNAR	CLASIFICACIÓN POR RECUBRIMIENTO DE SUELO	PUNTOS DE VALIDACIÓN			
		PLEIADES 1A		LANDSAT 8	
		Terreno - <i>in situ</i> **	Fotointerpretación*	Terreno - <i>in situ</i> **	Fotointerpretación*
La Punta y La Brava	Otros recubrimientos	204	-	75	-
	Cuerpos de agua	101	-	22	-
	Total sistema lagunar	305	-	97	-
Peine	Otros recubrimientos	-	50	-	73
	Cuerpos de agua	-	141	-	109
	Total sistema lagunar	-	191	-	182
Aguas de Quelana	Otros recubrimientos	-	74	-	74
	Cuerpos de agua	-	10	-	10
	Total sistema lagunar	-	84	-	84
Soncor	Otros recubrimientos	-	149	-	134
	Cuerpos de agua	-	107	-	99
	Total sistema lagunar	-	256	-	233
TOTAL GENERAL			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 las campañas de agosto y diciembre de 2020 para el levantamiento de puntos de información de sistemas lagunares, corresponden a receptores Full GNSS/GPS de doble frecuencia, tecnología geostacionaria de posicionamiento en tiempo real al decímetro (10 cm), con señal de corrección *Starfire*, un receptor GPS de alta sensibilidad con compatibilidad para HotFix® y GLONASS, marca Garmin serie eTrex® 20x, y a un receptor Full GNSS/GPS, diferencial, con precisión 0,25 m + 1 ppm RMS. Todos entregan información en coordenadas UTM 19S WGS84.

Además, se utilizó en aquellos sectores con permiso de acceso (Peine y La Punta La Brava en invierno 2020; y sólo La Punta La Brava para verano 2020), y en ambas campañas, un dron DJI modelo *Mavic Pro* con cámara de 12 mega pixeles, con vuelo programado a 200m de altura.

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 DJI modelo *Mavic Pro* con cámara de 12 mega pixeles el sector de La Punta y La Brava y Peine (invierno 2020) y sólo La Punta La Brava en verano 2020.

Posteriormente, en el software GIS ArcMap 10.6 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 -1A, 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 2020, este muestreo se implementó en los puntos de réplicas estacionales de las campañas de invierno y verano de 2016, 2017, 2018 y 2019, en zonas representativas de lagunas permanentes 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-1A

Las imágenes multispectrales de alta resolución usadas en el presente estudio, provienen del sensor Pleiades-1A, y en su conjunto conforman dos mosaicos, el primero en el sector sur que corresponde a los sistemas de Peine y La Punta y La Brava; y el segundo en el sector norte, que comprende los sistemas lagunares de Soncor y Aguas de Quelana (Figura N°4-2). La fecha de captura de invierno es 18 de agosto de 2020 y de verano es 25 de diciembre de 2020. 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 ortorrectificación puede encontrarse dentro 1m y 10m respectivamente. Las principales características del sensor se describen en la Tabla N°4-3, el ANEXO 9-7 y ANEXO 9-8 presentan el *metadata* de las imágenes analizadas.

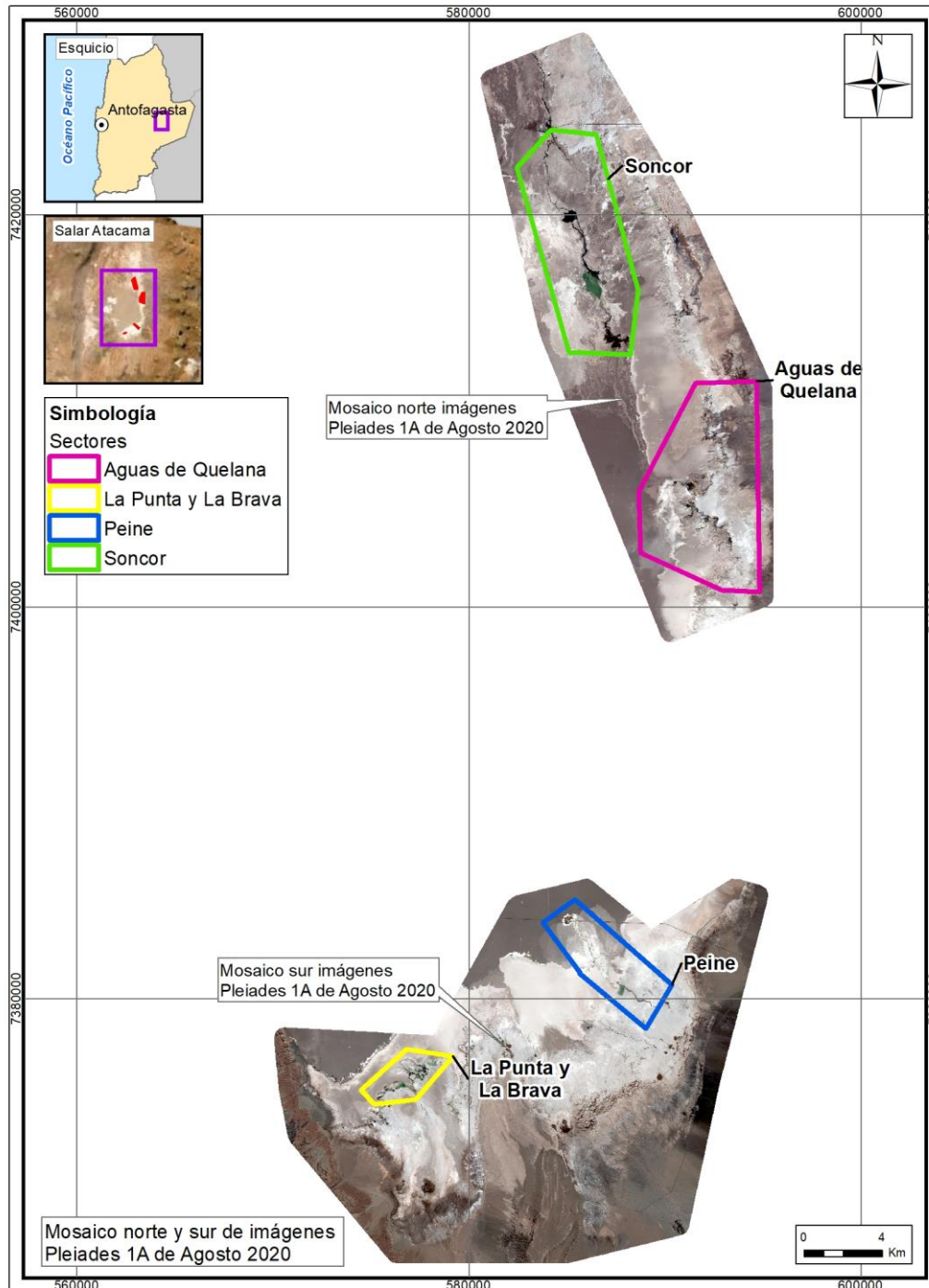
Tabla N°4-3. Características técnicas del sensor Pleiades-1A.

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>.

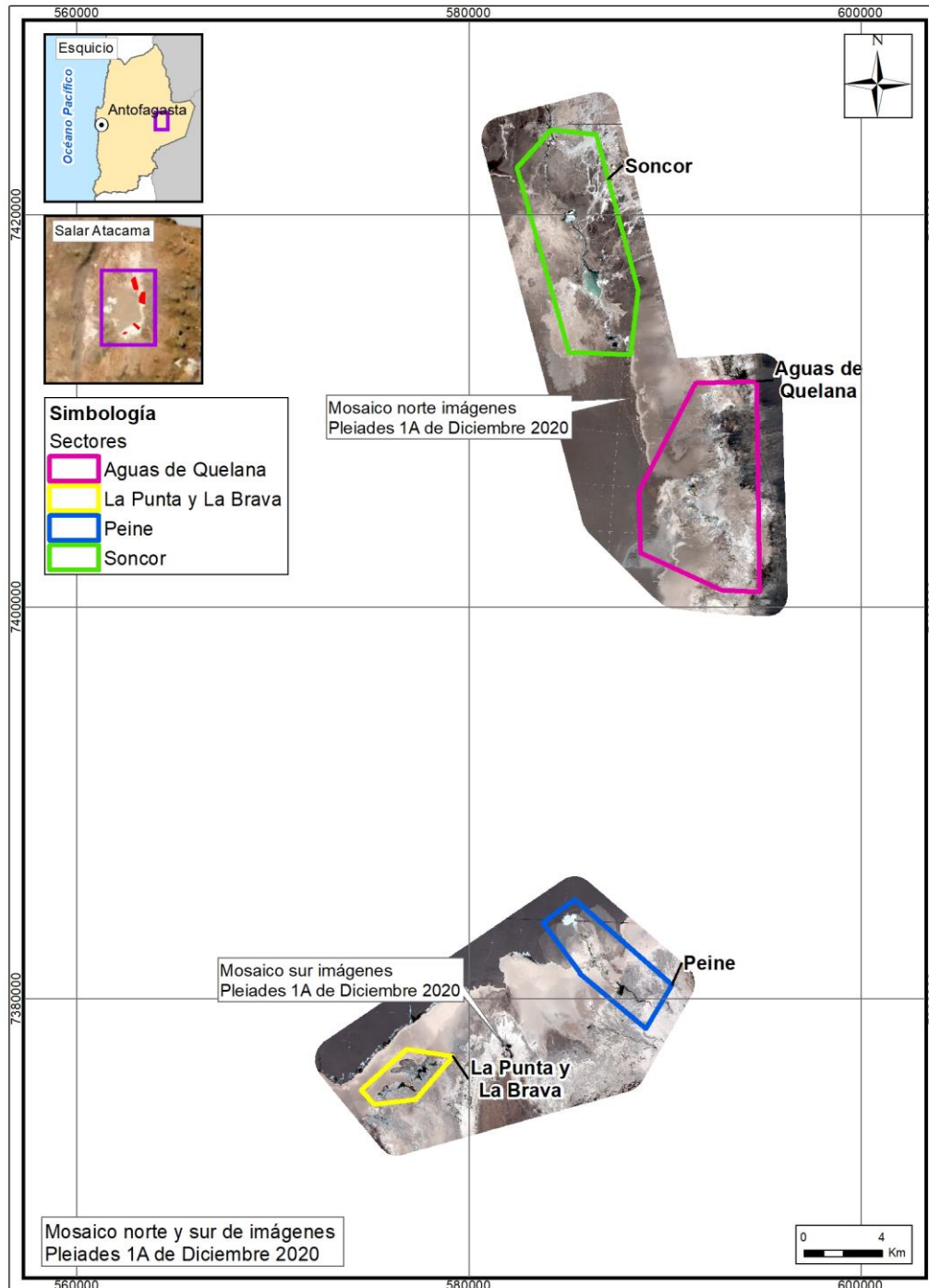
Visitada en agosto y diciembre 2020.

Figura N°4-2. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades-1A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama, invierno 2020.



Fuente: Cedrem Consultores en base a imágenes alta resolución Pleiades-1A (invierno 2020).

Figura N°4-3. Mosaicos norte y sur de imágenes de alta resolución Pleiades-1A usados para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua en sistemas lagunares del Salar de Atacama verano 2020.

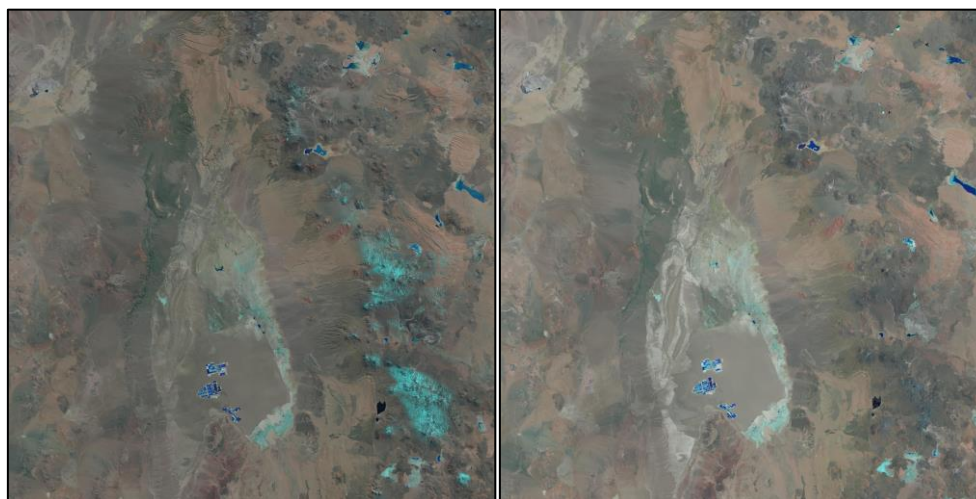


Fuente: Cedrem Consultores en base a imágenes alta resolución Pleiades-1A (verano 2020).

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 21 de agosto y 11 de diciembre de 2020⁷. La descarga se realiza en forma gratuita desde <http://earthexplorer.usgs.gov/>, sitio *web* de *United States Geological Survey* (USGS; Figura N°4-4). El sensor Landsat 8 dispone de 11 bandas espectrales, con una resolución (tamaño del pixel) 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°4-4. Imagen Landsat 8 correspondiente al cuadrante que incluye el área de estudio en invierno 2020 (izquierda – RGB) y verano 2020 (derecha - RGB).



Fuente: United States Geological Survey USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Visitada en agosto y diciembre de 2020.

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

⁷ Las Imágenes Landsat 8 en fechas paralelas al terreno (**semana del 14 de diciembre – 20 de diciembre**) presentan alta nubosidad (18,64% de cobertura de nubes) lo que dificulta el análisis de imágenes; por lo tanto, se opta por captura anterior (11 de diciembre) con mejor cobertura (0,43% cobertura de nubes).

Banda	Ancho (μm)	Resolución (m)
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 2020.

4.6.3 Procesamiento de las imágenes satelitales

Tanto las imágenes Landsat 8, como las Pleiades-1A 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 ($W / (m^2 * sr * \mu\text{m})$)⁸. 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. 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.

Es importante mencionar que este método en comparación al método IARR (por su sigla en inglés, y que corresponde al promedio interno de reflectancia relativa, aplicado en la línea de base), constituye un mejoramiento en el modelo actual, producto del refinamiento en el proceso de remoción del error atmosférico proporcionado por el modelo de *Airbus* (Chuvienco, 2006). Esta diferencia metodológica, puede variar la respuesta espectral de los parámetros espectrales utilizados (*i.e.* 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.

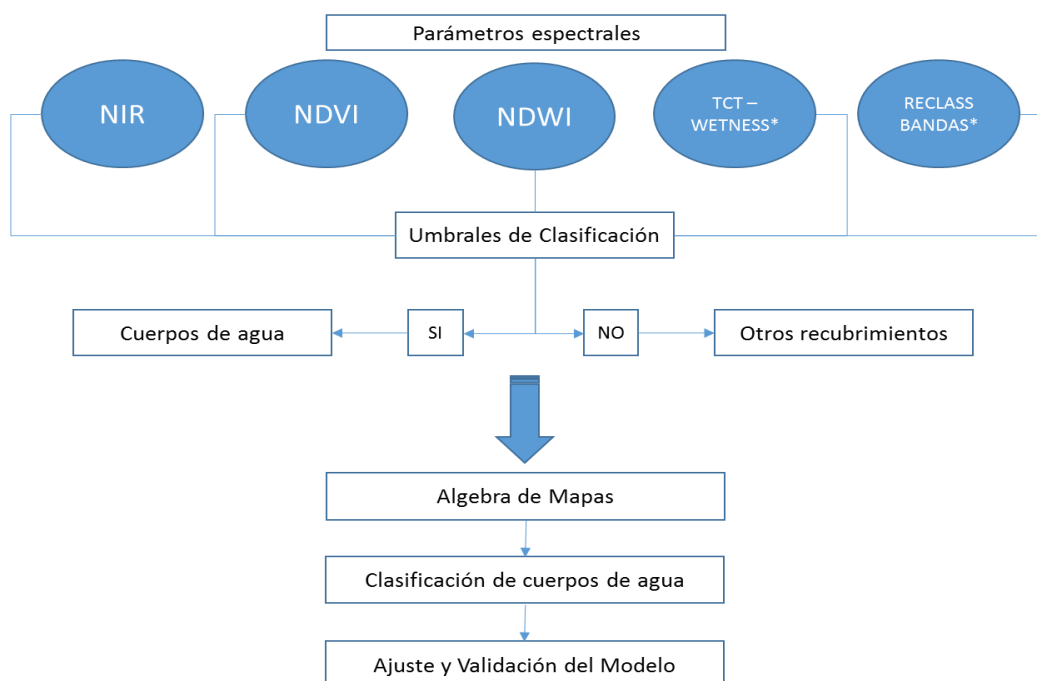
⁸ Dónde: W: Watts; m²: metro cuadrado; sr: estereorradián; μm : micrómetro.

Finalmente, en el caso de las imágenes de alta resolución Pleiades-1A, fueron unidas conformando dos mosaicos dentro del área de estudio (polígono norte y sur en la Figura N°4-2 y Figura N°4-3).

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 del proyecto RWL (2015); y que fue establecido como la línea de base para este componente.

Figura N°4-5. Modelo conceptual de árbol de decisiones usado para la clasificación supervisada de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales.



* La transformación “*Tasseled Cap*” *Wetness* se pudo utilizar sólo en el caso de Landsat 8, dado el mayor número de bandas que ofrece este sensor. En su reemplazo, para las imágenes de alta resolución Pleiades 1A se utilizó la Reclasificación de bandas (RECLASS BANDAS).

Fuente: Cedrem Consultores 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, mediante criterio de experto, de los umbrales de clasificación para cada uno de los parámetros espectrales de evaluación 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 el

paso anterior y se evalúa el ajuste y la precisión del modelo mediante la comparación con los datos validados en terreno/fotointerpretación (Figura N°4-5).

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

- i) La reclasificación de la banda infrarroja (NIR),
- ii) el índice NDWI;
- iii) el índice NDVI;
- iv) la reclasificación de bandas espectrales ($B1 < B2$) y ($B3 > B4$), usada en el modelo de imágenes de alta resolución Pleiades-1A y
- v) la 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 línea de base 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 los ajustes metodológicos aplicados en relación a la línea de base y las posibles implicancias en la estimación de los cuerpos de agua.

4.6.5 Parámetros espectrales del modelo de clasificación

a. Índice de Diferencia Normalizada de Agua - NDWI

El índice NDWI (por su sigla en inglés, *Normalized Difference Water Index*) 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 índice se realizó siguiendo la fórmula:

$$NDWI = (V - NIR) / (V + NIR)$$

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

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 infrarroja 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-1A.

c. NIR - Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

La Banda NIR (Banda 5 en Landsat 8 y Banda 4 en Pleiades-1A), 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-1A.

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-1A, 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 multiespectrales (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 se 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 realiza mediante inspección visual, controlada por el conocimiento de las características de los objetos a catalogar, su respuesta espectral y los umbrales determinados en campañas anteriores. Además, este proceso se realizó en base a la representación del patrón espacial de las coberturas de la línea de base (Adenda 5 RWL, 2015). Cabe destacar que las variaciones de estos valores respecto a la línea de base son atribuibles al cambio del tipo de imágenes satelitales usadas, a las variaciones atmosféricas, las diferencias en el procesamiento de éstas y a cambios en los valores del conjunto de datos de cada imagen, correspondientes a los ajustes metodológicos detallados en el ANEXO 9-6.

Tabla N°4-5. Valores de los umbrales de clasificación de los parámetros espectrales usados, según Pleiades 1A y Landsat 8, para la delimitación de cuerpos de agua en los sistemas lagunares del Salar de Atacama, agosto y diciembre de 2020.

TIPO DE IMAGEN	ÍNDICE	SISTEMA LAGUNAR			
		LA PUNTA - LA BRAVA	PEINE	AGUAS DE QUELANA	SONCOR
Invierno 2020					
Parámetros LANDSAT 8	NDWI	P90 >= -0,161954	P90 >= -0,159548	NB 18/25 >= -0,16146	NB 14/30 >= -0,17634
	NDVI	P10 <= 0,041983	P10 <= 0,04598	R 16/32 <= 0,027946	NB 17/30 <= 0,042675
	NIR - B5	R8/15 <= 0,321609	P15 <= 0,356094	R 13/32 <= 0,297894	P10 <= 0,249695
	WETNESS	R10/15 >= 0,201144	R 8/20 >= 0,146443	P95 >= 0,177915	P60 >= 0,036399
Parámetros AR PLEIADES	NDWI	R 10/32 >= -0,078836	NB 3/9 >= -0,055967	NB 14/25 >= -0,076662	NB 3/9 >= -0,105389
	NDVI	R 21/32 <= 0,011472	P5 <= 0,030008	R 15/32 <= 0,016086	R 6/10 <= 0,003875
	NIR - B4	P10 <= 0,278431	NB 10/25 <= 0,341176	R 7/32 <= 0,24472	P5 <= 0,155255
	(B1<B2) y (B3>B4)	SI	SI	NO	SI
Verano 2020					
Parámetros LANDSAT 8	NDWI	P95 >= -0,124599	R 3/20 >= -0,128903	R 11/17 >= -0,116064	P90 >= -0,139196
	NDVI	P5 <= 0,051088	P5 <= 0,052355	NB 8/32 <= 0,06331	P5 <= 0,0585
	NIR - B5	R 10/15 <= 0,45733	P10 <= 0,428633	R 10/32 <= 0,34635	P5 <= 0,313215
	WETNESS	NO	R 11/20 >= 0,237264	NO	P75 >= 0,080553
Parámetros AR PLEIADES	NDWI	R 5/15 >= -0,010288	P95 >= -0,076503	NB 19/32 >= -0,061077	NB 10/15 >= -0,02834
	NDVI	R 14/20 <= 0,033258	P5 <= 0,032258	R 14/32 <= 0,009104	P5 <= 0,027397
	NIR - B4	P5 <= 0,403922	NB 2/9 <= 0,298039	NB 9/32 <= 0,327797	R 2/10 <= 0,225098
	(B1<B2) y (B3>B4)	SI	SI	SI	SI

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 a las variaciones temporales del sensor y la naturaleza de los sustratos. 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 10.6. 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 tres 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*⁹, 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

⁹ 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).

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 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

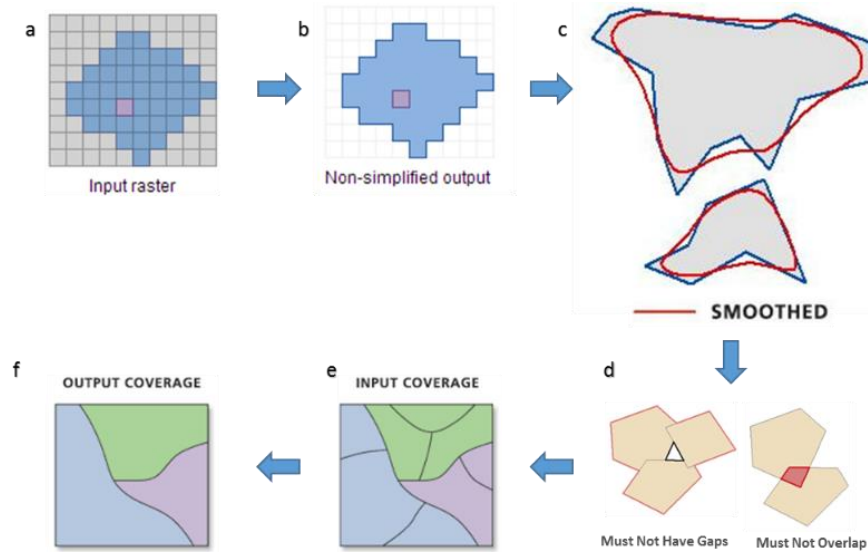
Posterior a obtener las coberturas de clasificación de los cuerpos de agua según el tipo de imagen satelital usada (Pleiades-1A y Landsat 8) y por sistema lagunar, se procedió con la depuración de las coberturas. Este proceso consistió primero en la transformación de los datos desde formato raster a entidades de polígonos en formato shape. 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°4-6).

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

- i) Remoción de polígonos clasificados como cuerpos de agua con tamaño inferior al equivalente de un pixel (0,0004 ha en Pleiades-1A y 0,09 ha en Landsat 8) y que estuvieran aislados a los cuerpos de agua de mayor tamaño dentro del sector de estudio y,
- ii) Revisión y ajuste de las coberturas mediante fotointerpretación en cuerpos de agua permanentes, siguiendo el patrón espacial de los registros de línea de base (Adenda 5 RWL, 2015) y de los monitoreos de invierno y verano de 2020, sobre las imágenes de alta resolución y Landsat 8.

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 y La Brava, Peine, Aguas de Quelana y Soncor).

Figura N°4-6. 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 a 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, en base a las siguientes tipologías:

- *Comparación con registros históricos de línea de base:* se realizó entre el resultado de las superficies de lagunas registradas en los monitoreos de agosto y diciembre 2020, y las variaciones en relación al mínimo histórico de la línea de base (Adenda 5 RWL, 2015).
- *Comparación entre imágenes satelitales:* se realizó una comparación entre las superficies determinadas en el monitoreo 2020 desde las imágenes de alta resolución Pleiades-1A y Landsat 8.
- *Comparación entre monitoreos anuales:* se realizó una comparación entre los resultados de las superficies lagunares en el monitoreo 2020, con respecto a los resultados de los monitoreos 2016, 2017, 2018 y 2019.

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

4.8 Fechas de medición

La campaña de invierno de 2020 se realizó entre el 19 y el 22 de agosto de 2020, en tanto las imágenes Pleiades 1A, se obtuvieron el 18 de agosto de 2020 y las imágenes Landsat 8, fueron capturadas el 21 de agosto de 2020. Respecto a la campaña de verano 2020, ésta se realizó el 19 de diciembre de 2020, y las imágenes Pleiades 1A, se obtuvieron el 25 de diciembre de 2020 y las imágenes Landsat 8, fueron capturadas el 11 de diciembre de 2020. Las fechas y datos de las imágenes utilizadas en el análisis se presentan en el ANEXO 9-7 y ANEXO 9-8.

5 RESULTADOS

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

La clasificación supervisada de cuerpos de agua, basada en datos de terreno, se llevó a cabo para imágenes Pleiades-1A y Landsat 8 en los sistemas lagunares Peine y La Punta - La Brava, para el periodo de agosto de 2020, en tanto para el periodo de diciembre de 2020, esta condición se cumplió sólo en el sistema lagunar de La Punta y La Brava. Sin embargo, se procedió con la fotointerpretación en base a imágenes de alta resolución, cuando la condición de terreno se vio restringida o limitada por condiciones sanitarias (Pandemia Covid-19) o afectación a la fauna local (limitación en el acceso por parte de la Comunidad de Peine, a áreas con poblaciones de flamencos en fase reproductiva). El sector norte conformado por los sistemas Soncor y Aguas de Quelana, y debido a que forman parte de la Reserva Nacional Los Flamencos, fueron parte del protocolo de cierre de reservas que integran el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), como parte de las medidas de prevención de la pandemia por Covid-19, esto limitó el acceso en la campaña de invierno 2020 y persistía a la fecha del monitoreo de verano 2020.

La validación del ajuste de las coberturas determinadas, en relación a los datos de terreno recabados y fotointerpretados, se realizó mediante el índice *Kappa*. Este índice tuvo una variación entre 0,64 y 0,98 para imágenes de alta resolución Pleiades-1A (Tabla N°5-1) y desde 0,56 y 0,80 para imágenes de resolución media Landsat 8 (Tabla N°5-2) en agosto de 2020. Respecto de diciembre de 2020, este índice tuvo una variación entre 0,37 y 0,94 para imágenes de alta resolución Pleiades-1A (Tabla N°5-3) y desde 0,44 a 0,75 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 *aceptable a casi perfecta*¹⁰.

En relación a la precisión global, los valores tuvieron una variación entre 83% y 99% para imágenes de alta resolución Pleiades-1A (Tabla N°5-1) y desde 79% y 92% para imágenes de resolución media Landsat 8 (Tabla N°5-2) en agosto de 2020. Respecto de diciembre de 2020, la precisión global del modelo tuvo una variación entre 85% y 97% para imágenes de alta resolución Pleiades-1A (Tabla N°5-3) y desde 82% a 95% 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,

¹⁰ 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).

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, en todos los sectores y para ambas temporadas (agosto 2020 y diciembre 2020).

Tabla N°5-1. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1A: Matriz de confusión y el índice Kappa por sistema lagunar. Agosto, 2020.

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	83	52	135	61,5	38,5	
	Otros Recubrimientos	0	170	170	100,0	0,0	
	Total	83	222	305	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	76,6	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	23,4	-	-	Índice Kappa:	0,64
						Precisión global (OA):	83%
Peine	Cuerpos de agua	129	3	132	97,7	2,3	
	Otros Recubrimientos	0	59	59	100,0	0,0	
	Total	129	62	191	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	95,2	-	-	-	
	**Error omisión (%)	0,0	4,8	-	-	Índice Kappa:	0,96
						Precisión global (OA):	98%
Aguas de Quelana	Cuerpos de agua	21	4	25	84,0	16,0	
	Otros Recubrimientos	0	59	59	100,0	0,0	
	Total	21	63	84	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	93,7	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	6,3	-	-	Índice Kappa:	0,88
						Precisión global (OA):	95%
Soncor	Cuerpos de agua	130	1	131	99,2	0,8	
	Otros Recubrimientos	2	123	125	98,4	1,6	
	Total	132	124	256	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	98,5	99,2	-	-	-	
	***Error omisión (%)	1,5	0,8	-	-	Índice Kappa:	0,98
						Precisión global (OA):	99%

Dónde: * número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo **Exactitud global del mapa: 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, 2020.

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	25	17	42	59,5	40,5	
	Otros Recubrimientos	3	52	55	94,5	5,5	
	Total	28	69	97	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	89,3	75,4	-	-	-	
	***Error omisión (%)	10,7	24,6	-	-	Índice Kappa:	0,56
						Precisión global (OA):	79%
Peine	Cuerpos de agua	117	7	124	94,4	5,6	
	Otros Recubrimientos	11	47	58	81,0	19,0	
	Total	128	54	182	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	91,4	13,0	-	-	-	
	**Error omisión (%)	8,6	87,0	-	-	Índice Kappa:	0,77
						Precisión global (OA):	90%
Aguas de Quelana	Cuerpos de agua	21	4	25	84,0	16,0	
	Otros Recubrimientos	3	56	59	94,9	5,1	
	Total	24	60	84	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	87,5	93,3	-	-	-	
	***Error omisión (%)	12,5	6,7	-	-	Índice Kappa:	0,80
						Precisión global (OA):	92%
Soncor	Cuerpos de agua	118	0	118	100,0	0,0	
	Otros Recubrimientos	26	89	115	22,6	77,4	
	Total	144	89	233	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	81,9	100,0	-	-	-	
	***Error omisión (%)	18,1	0,0	-	-	Índice Kappa:	0,78
						Precisión global (OA):	89%

Dónde: * número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo **Exactitud global del mapa: 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°5-3. Validación de la clasificación supervisada de cuerpos de agua desde imágenes satelitales Pleiades 1A: Matriz de confusión y el índice Kappa por sistema lagunar. Diciembre de 2020.

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	56	45	101	55,4	44,6	
	Otros Recubrimientos	0	204	204	100,0	0,0	
	Total	56	249	305	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	100,0	81,9	-	-	-	
	***Error omisión (%)	0,0	18,1	-	-	Índice Kappa:	0,62
						Precisión global (OA):	85%
Peine	Cuerpos de agua	122	19	141	86,5	13,5	
	Otros Recubrimientos	3	47	50	94,0	6,0	
	Total	125	66	191	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	97,6	71,2	-	-	-	
	**Error omisión (%)	2,4	28,8	-	-	Índice Kappa:	0,73
						Precisión global (OA):	88%
Aguas de Quelana	Cuerpos de agua	5	5	10	50,0	50,0	
	Otros Recubrimientos	7	67	74	90,5	9,5	
	Total	12	72	84	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	41,7	93,1	-	-	-	
	***Error omisión (%)	58,3	6,9	-	-	Índice Kappa:	0,37
						Precisión global (OA):	86%
Soncor	Cuerpos de agua	107	0	107	100,0	0,0	
	Otros Recubrimientos	8	141	149	94,6	5,4	
	Total	115	141	256	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	93,0	100,0	-	-	-	
	***Error omisión (%)	7,0	0,0	-	-	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 global del mapa: 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 2020.

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	10	12	22	45,5	54,5	
	Otros Recubrimientos	5	70	75	93,3	6,7	
	Total	15	82	97	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	66,7	85,4	-	-	-	
	***Error omisión (%)	33,3	14,6	-	-	Índice Kappa:	0,44
						Precisión global (OA):	82%
Peine	Cuerpos de agua	96	13	109	88,1	11,9	
	Otros Recubrimientos	11	62	73	84,9	15,1	
	Total	107	75	182	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	89,7	17,3	-	-	-	
	**Error omisión (%)	10,3	82,7	-	-	Índice Kappa:	0,73
						Precisión global (OA):	87%
Aguas de Quelana	Cuerpos de agua	7	3	10	70,0	30,0	
	Otros Recubrimientos	1	73	74	98,6	1,4	
	Total	8	76	84	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	87,5	96,1	-	-	-	
	***Error omisión (%)	12,5	3,9	-	-	Índice Kappa:	0,75
						Precisión global (OA):	95%
Soncor	Cuerpos de agua	95	4	99	96,0	4,0	
	Otros Recubrimientos	29	105	134	21,6	78,4	
	Total	124	109	233	-	-	
	Exactitud de Campo (%)	76,6	96,3	-	-	-	
	***Error omisión (%)	23,4	3,7	-	-	Índice Kappa:	0,72
						Precisión global (OA):	86%

Dónde: * número de puntos verificados en terreno – *in situ* – o fotointerpretados, en donde hubo coincidencia con la información del modelo **Exactitud global del mapa: 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

El sistema lagunar que muestra mayor ajuste en agosto de 2020 desde imágenes Pleiades 1A es Soncor con 0,98, y en Landsat 8 es Aguas de Quelana con 0,80. En el caso del sistema Soncor 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 2020 se observa en el sector de La Punta y La Brava, para ambos tipos de sensores, con 0,64 en Pleiades 1A y 0,56 en Landsat 8; esto se debe principalmente a la fisonomía de los cuerpos de agua con poca definición de bordes y discontinuidad de las áreas inundadas.

En cuanto al mayor ajuste de diciembre de 2020, se observa en el sistema lagunar de Soncor con 0,94 para Pleiades 1A; y en tanto para Landsat 8 el mejor ajuste se observa en el sector de Aguas de Quelana con 0,75. Dada la fisonomía del sector Aguas de Quelana, con cuerpos de agua dispersos y de menor tamaño en comparación al resto de los sectores de estudio, y la contracción de las áreas de inundación en diciembre 2020, se produjo una mayor sectorización de los cuerpos de agua (mayor definición de áreas inundadas, con baja de zonas de transición), que junto con la resolución espacial de las imágenes Landsat 8 (que inciden en la caracterización del contorno de los recubrimientos analizados sobrestimando bordes, aumentando así las área resultantes), produjo una mejor coincidencia del modelo con lo establecido por el método de fotointerpretación. Sin embargo, para el caso de mayor definición de los bordes o contorno del recubrimiento agua, por la mejora del contraste y respuesta que otorga las imágenes de alta resolución, las áreas de ocupación presentaron una baja en el modelo propuesto desde este tipo de imágenes, que se tradujo en una menor concordancia de lo analizado mediante la fotointerpretación de las imágenes con discordancias en los puntos de validación principalmente en las zonas delimitantes; esto se tradujo en el menor ajuste para el periodo diciembre 2020 en Aguas de Quelana para Pleiades 1A (0,37). Para Landsat 8 el menor ajuste lo presenta el sector La Punta y La Brava (0,44), siendo principalmente en este caso la fisonomía de los cuerpos de agua y la existencia de combinación de recubrimientos (agua – vegetación), lo que disminuye la coincidencia del modelo con lo detectado en terreno – *in situ*.

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 2020, se observa que la mayor cobertura tanto en invierno 2020 como en verano 2020, son para el sector Soncor con 255,3 ha y 168,9 ha desde Pleiades 1A, respectivamente. En tanto, las menores superficies observadas desde el análisis con Landsat 8, se presentaron en el sector Aguas de Quelana, en invierno 2020 con 18,7 ha y 8,5 ha en verano 2020.

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 1A) y la comparación tanto con los registros de línea de base, 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 1A y datos obtenidos en el monitoreo 2020 (invierno y verano), respecto de los registros de línea de base (Adenda 5 RWL, 2015).

Sistema Lagunar	Superficies de registros históricos AR (Adenda 5 RWL, 2015)			Superficies desde alta resolución (Pleiades 1A)					
	Promedio (ha)	Máximo (ha)	Mínimo (ha)	Invierno 2020		Verano 2020		Promedio anual (2020)	
				ha	m ²	ha	m ²	ha	m ²
La Punta y La Brava	33,8	35	31,6	51,4	514.417,6	28,4	284.172,6	39,9	399.295,1
Peine	64,8	73,6	48,9	54,2	542.094,0	73,5	734.637,7	63,8	638.365,9
Aguas de Quelana	22,2	33,1	11,3	17,2	171.738,5	8,5	85.441,2	12,9	128.589,9
Soncor	217,4	234,2	192,4	255,3	2.552.515,9	168,9	1.689.477,5	212,1	2.120.996,7

Fuente: Cedrem Consultores

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 2020 (invierno y verano), respecto de los registros de línea de base (Adenda 5 RWL, 2015).

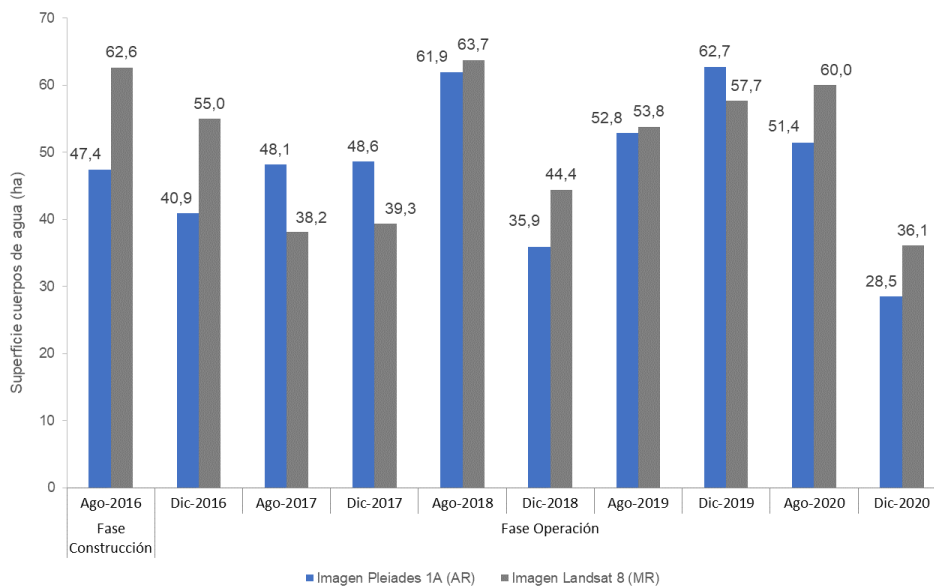
Sistema Lagunar	Superficies de registros históricos AR (Adenda 5 RWL, 2015)			Superficies desde alta resolución (Landsat 8)					
	Promedio (ha)	Máximo (ha)	Mínimo (ha)	Invierno 2020		Verano 2020		Promedio anual (2020)	
				ha	m ²	ha	m ²	ha	m ²
La Punta y La Brava	33,8	35	31,6	60,0	600.191,3	36,1	360.957,7	48,1	480.574,5
Peine	64,8	73,6	48,9	105,4	1.054.402,8	83,0	830.121,6	94,2	942.262,2
Aguas de Quelana	22,2	33,1	11,3	18,7	187.456,8	8,5	84.779,6	13,6	136.118,2
Soncor	217,4	234,2	192,4	331,6	3.315.701,1	225,5	2.255.468,3	278,6	2.785.584,7

Fuente: Cedrem Consultores

5.2.1 La Punta y La Brava

En el sistema lagunar La Punta y La Brava, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades-1A en agosto de 2020 es de 51,4 ha y en diciembre 2020 abarca una superficie de 28,5 ha (Tabla N°5-5). La Figura N°5-1 y Figura N°5-3 muestran los resultados gráficos y numéricos de las superficies monitoreadas entre 2016 a 2020, 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 y La Brava.



Dónde; **MR**: Imagen de Mediana Resolución (pixel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (pixel 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 60,0 ha en agosto de 2020 y en diciembre 2020, se calculó que la cobertura de cuerpos es de 36,1 ha. Estos valores (agosto 2020) en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat 8 sobre Pleiades 1-A de un +14% (+8,6,0 ha) para este periodo. Desde imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 36,1 ha en diciembre de 2020, estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat sobre Pleiades de un +21,3% (+7,7 ha) para este periodo. Estas diferencias son atribuibles principalmente a la resolución espacial (tamaño pixel), y, por ende, al mayor grosor de los resultados del modelo de media resolución versus un modelo con mayor detalle que entrega el modelo de alta resolución (mayor definición de los bordes o contorno del recubrimiento, por la mejora del contraste y respuesta espectral que otorga las imágenes de alta resolución).

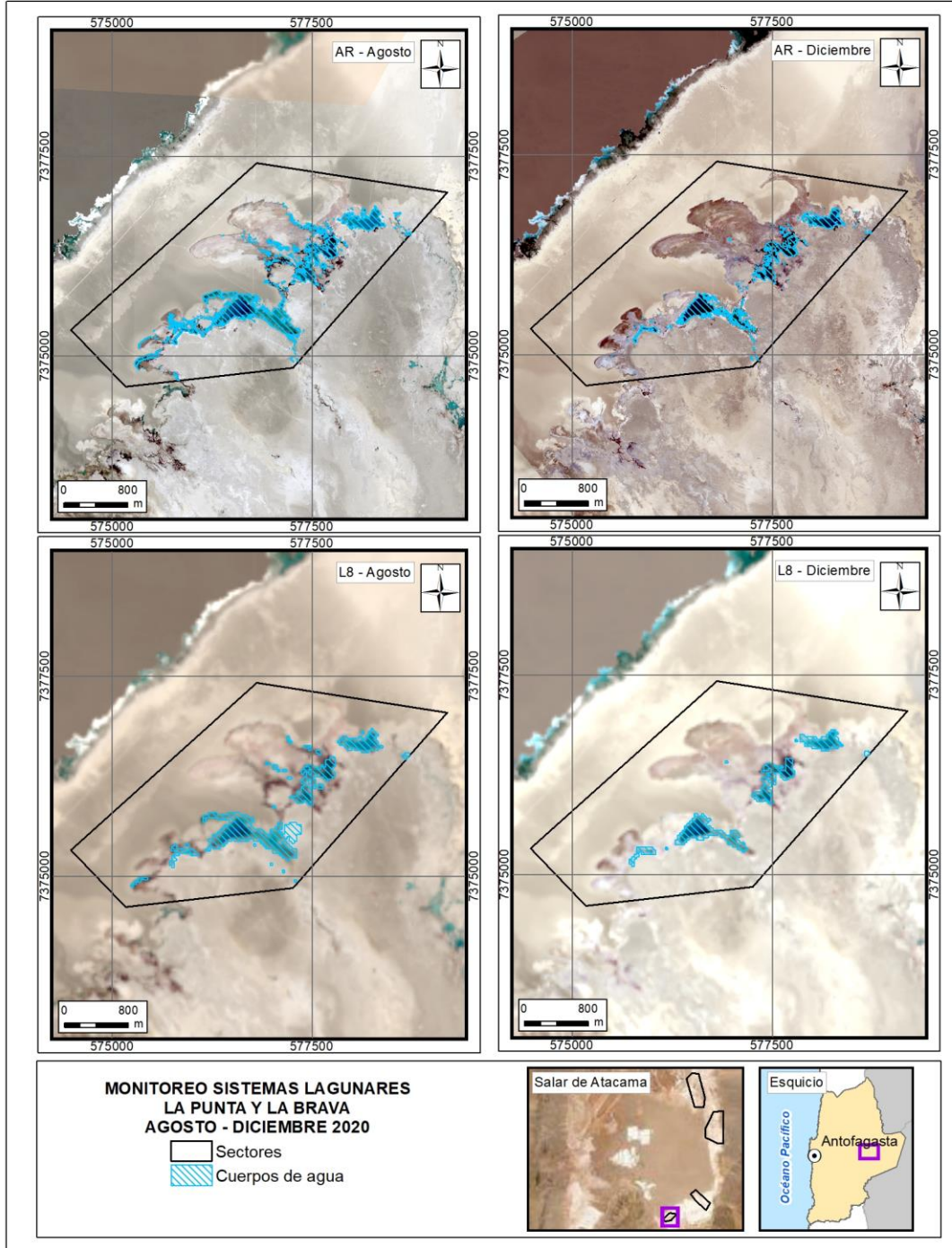
La correlación entre las superficies desde 2016 a 2020 en el sector La Punta y la Brava, calculadas desde de alta resolución (Pleiades) y desde media resolución (Landsat), y según el coeficiente de

correlación de Pearson, muestra que las variables tienen una correlación de 0,635¹¹ lo que indica una relación positiva moderada entre variables; mientras que el valor p es de 0,05. Puesto que el valor p es igual que el nivel de significancia de 0,05, la correlación es estadísticamente significativa aunque no concluyente.

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 y la Brava, se observan variaciones cíclicas interanuales, con un aumento de las superficies observables de los cuerpos de agua en el registro de invierno 2018 y verano 2019, tanto en las imágenes de alta como de mediana resolución, que se mantienen hasta los registros de agosto 2020 y que luego descienden en diciembre 2020. Las áreas de verano 2020, resultan ser las más bajas en comparación con épocas mínimas de verano anterior, como las de diciembre 2018 y diciembre 2016.

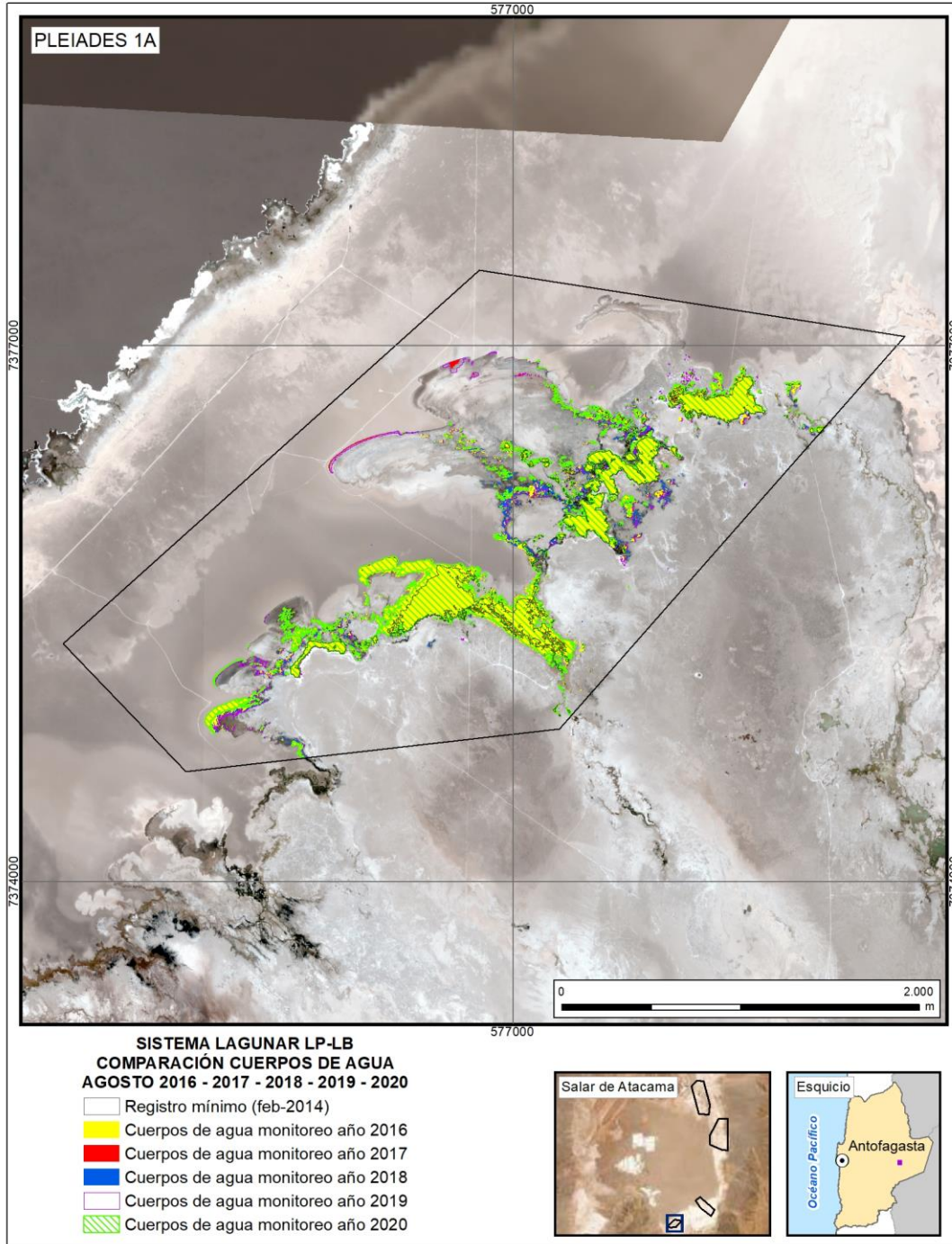
¹¹ El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

Figura N°5-2. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades-1A y Landsat 8 en el sistema lagunar La Punta y La Brava, agosto – diciembre 2020.



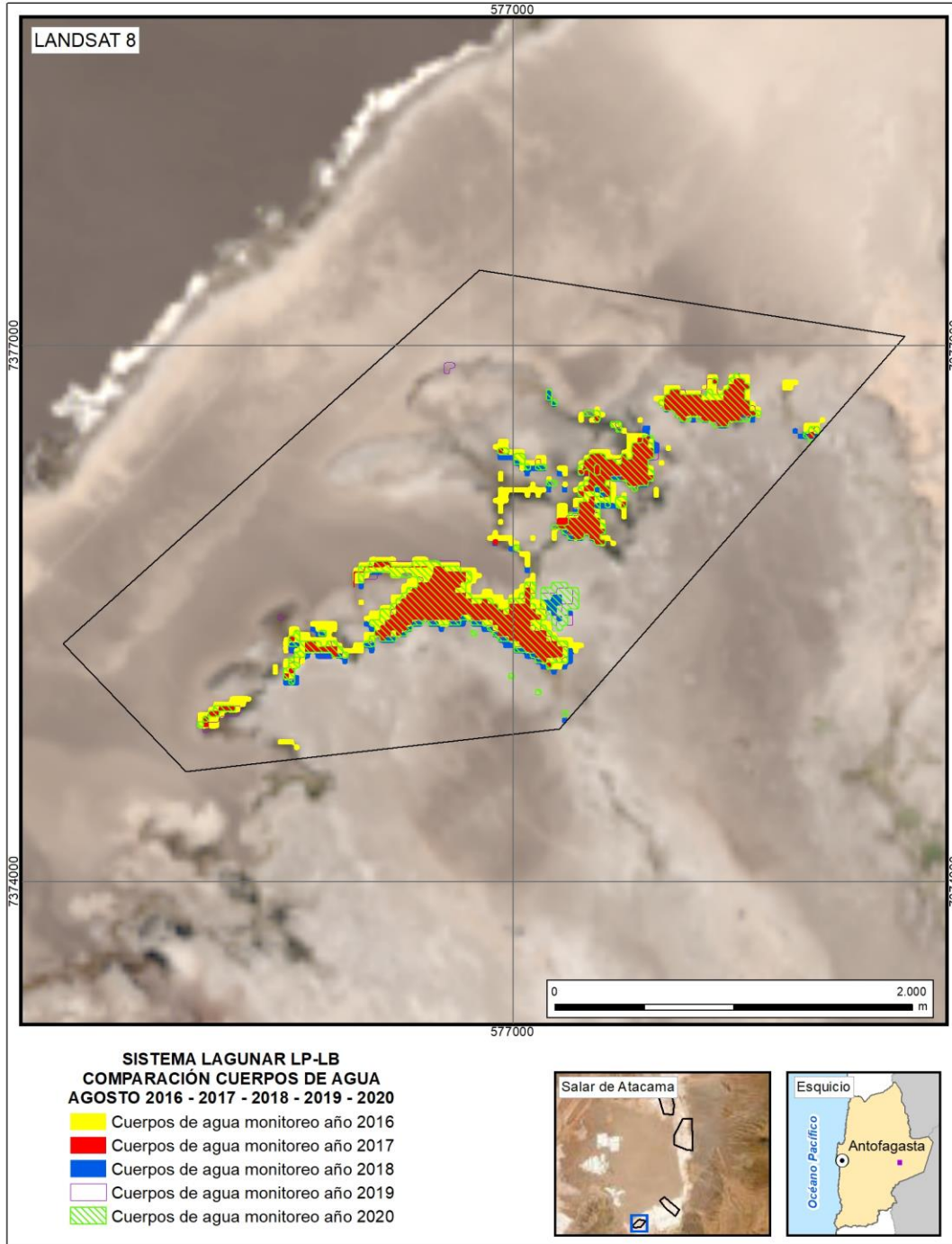
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre de 2020.

Figura N°5-3. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector La Punta y La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1A.



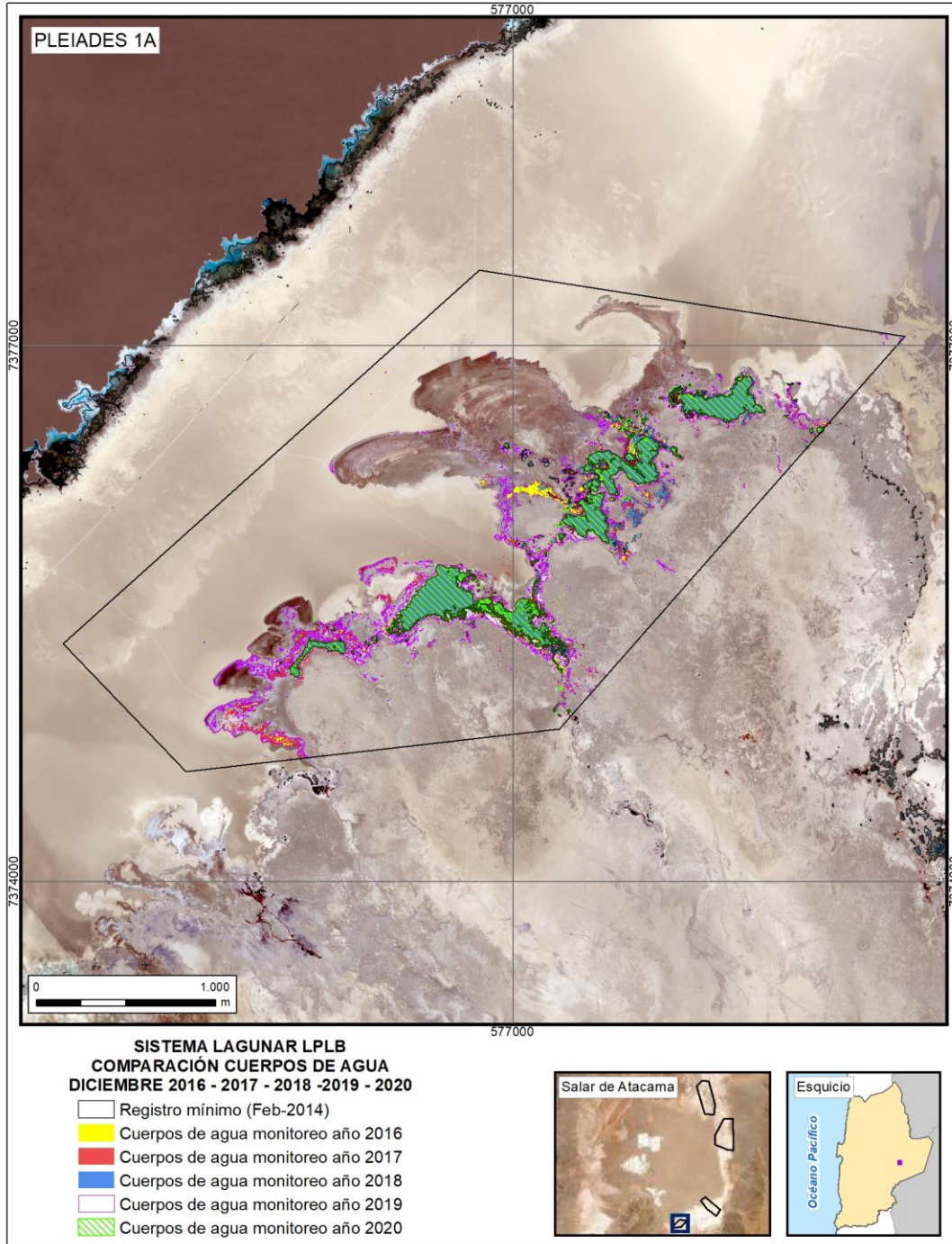
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2020

Figura N°5-4. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 - 2019 y 2020, sector La Punta y La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.



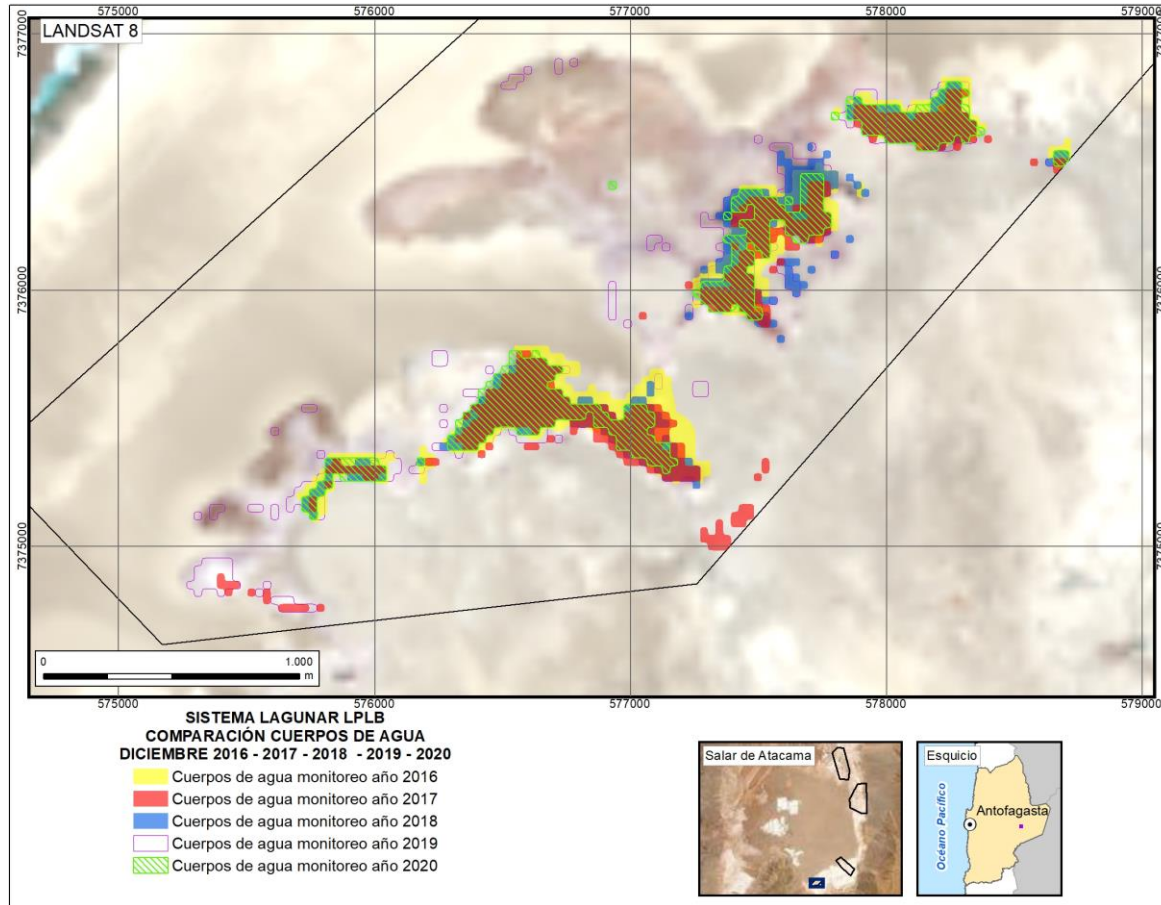
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2020

Figura N°5-5. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 - 2019 y 2020, sector La Punta y La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1A.



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2020

Figura N°5-6. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017–2018 – 2019 y 2020, sector La Punta y La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.

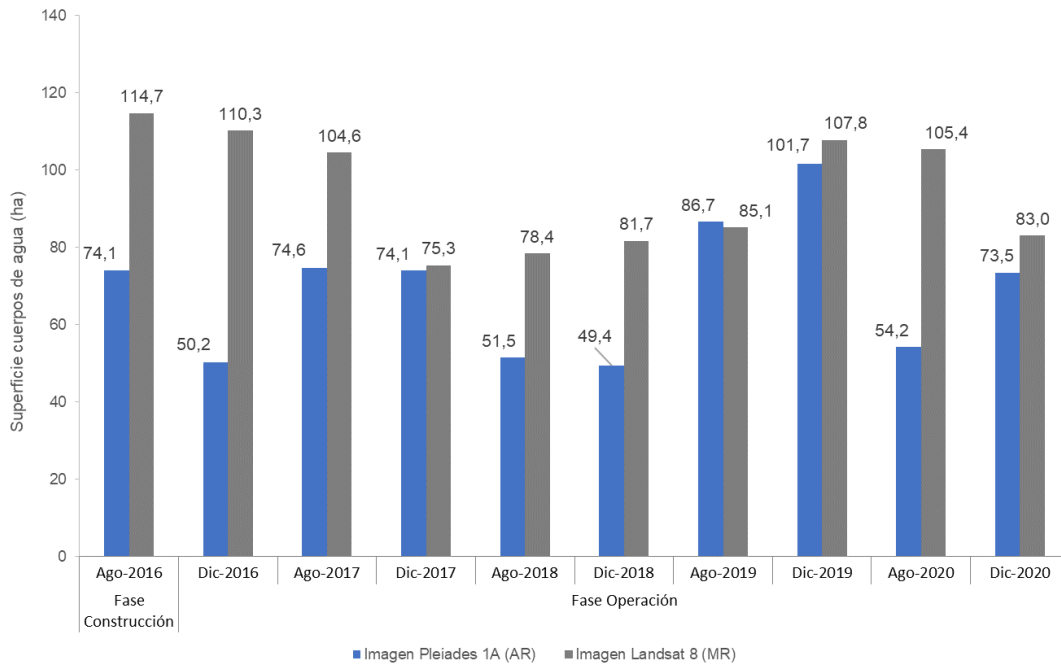


Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2020

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-1A en agosto de 2020 es de 54,2 ha y en diciembre 2020 abarca una superficie de 73,57 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 2020, 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 (pixel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (pixel menor a 4m).
 Fuente: Cedrem Consultores a partir de modelo de clasificación supervisada.

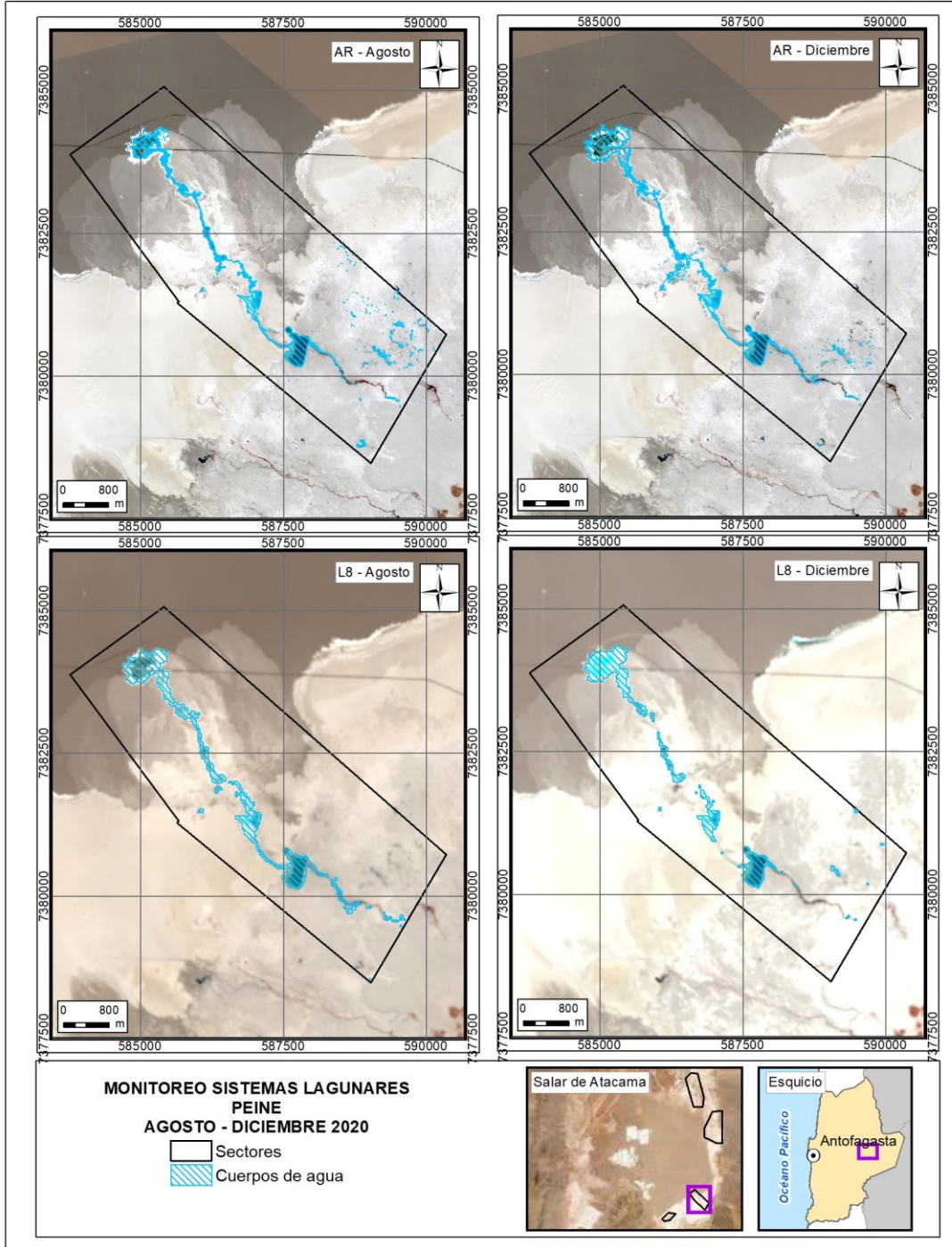
En el sistema lagunar Peine, desde las imágenes Landsat 8 se calculó una cobertura de cuerpos de agua que abarca una superficie de 105,4 ha en agosto de 2020; estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat 8 sobre Pleiades 1-A de un +48,6% (+51,2 ha) para este periodo. Para las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 83,0 ha en diciembre de 2020, estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat sobre Pleiades de un +11,5% (+9,5 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. Estas diferencias marcan las superficies de zonas de transición, como canales de conexión o zonas ribereñas; pero principalmente el sector de la Laguna Interna.

La correlación entre las superficies del sector Peine desde 2016 a 2020, 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 0,150¹² lo que indica una relación positiva baja entre variables; mientras que el valor p es de 0,680 lo que indica que existe evidencia no concluyente sobre la significancia estadística de la asociación entre las variables AR y Landsat.

Las Figura N°5-9 a la Figura N°5-12, muestran los cambios en las superficies de los cuerpos de agua, desde 2016 a la fecha, y su representación espacial respectivamente. Para el sector Peine, la comparación entre monitores muestra una similitud en las superficies en los monitores de agosto 2016, agosto 2017 y diciembre 2020; con un aumento de las superficies observadas en los monitoreos de agosto 2019 y diciembre 2019.

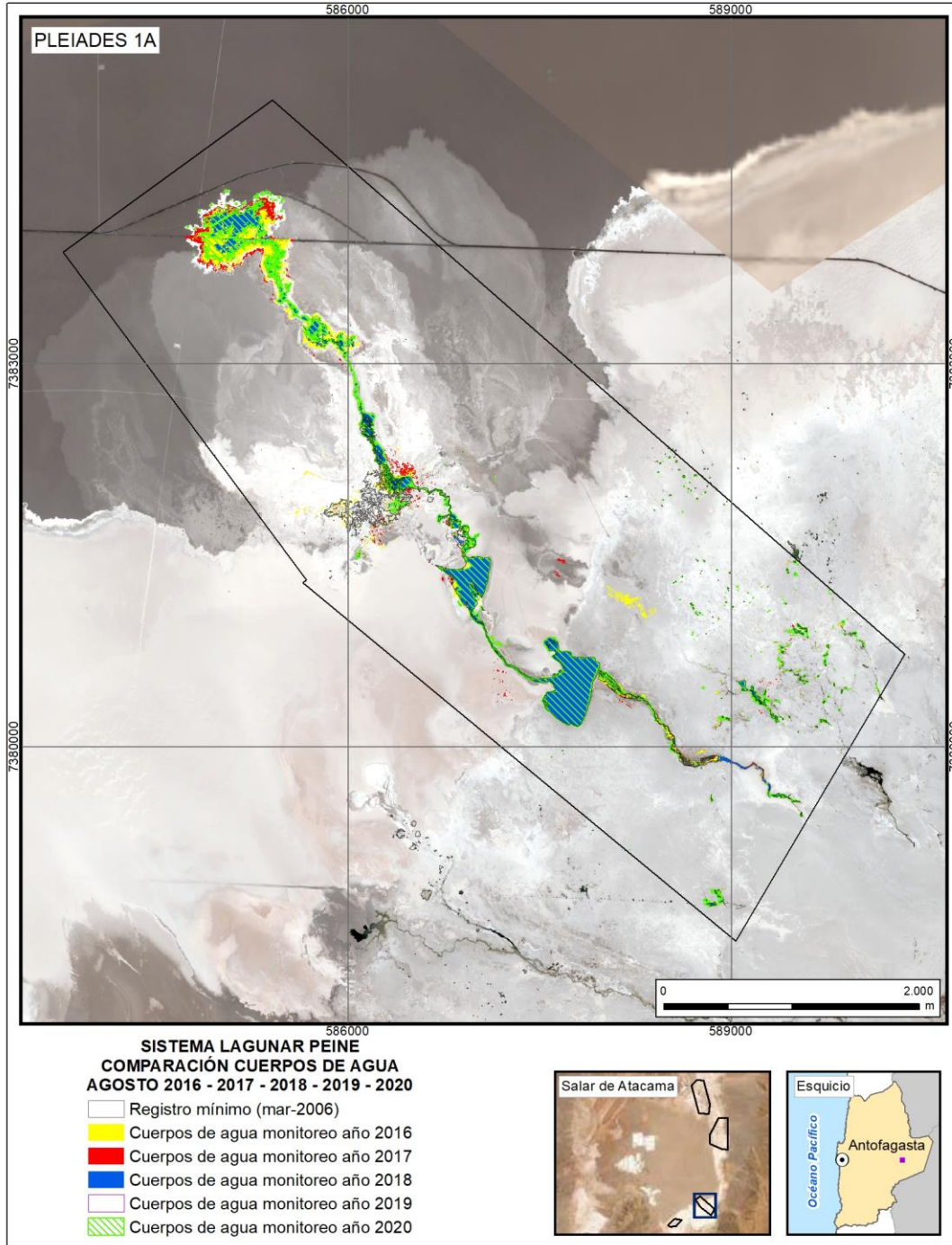
¹² El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

Figura N°5-8. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Peine, agosto – diciembre 2020.



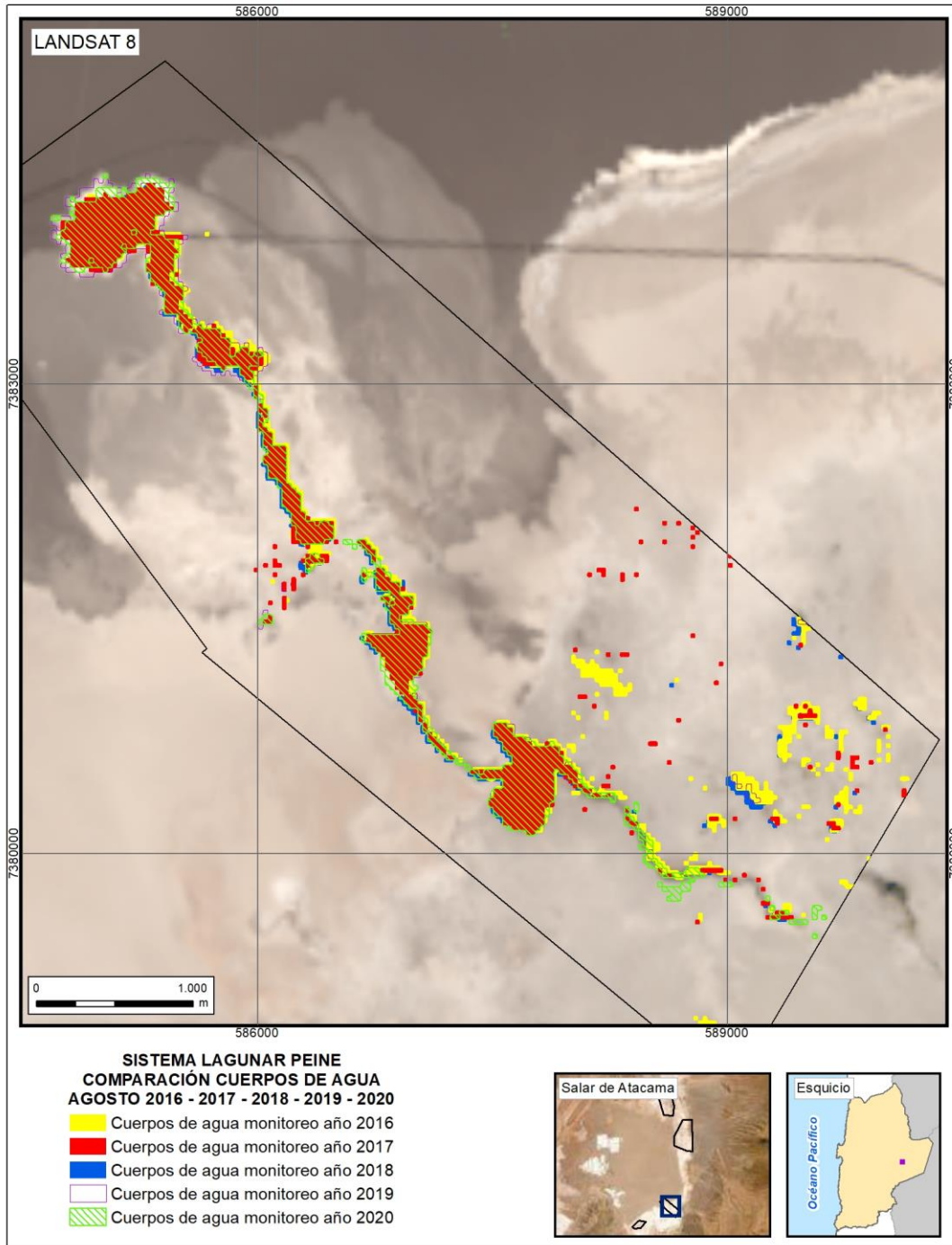
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre 2020.

Figura N°5-9. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1A.



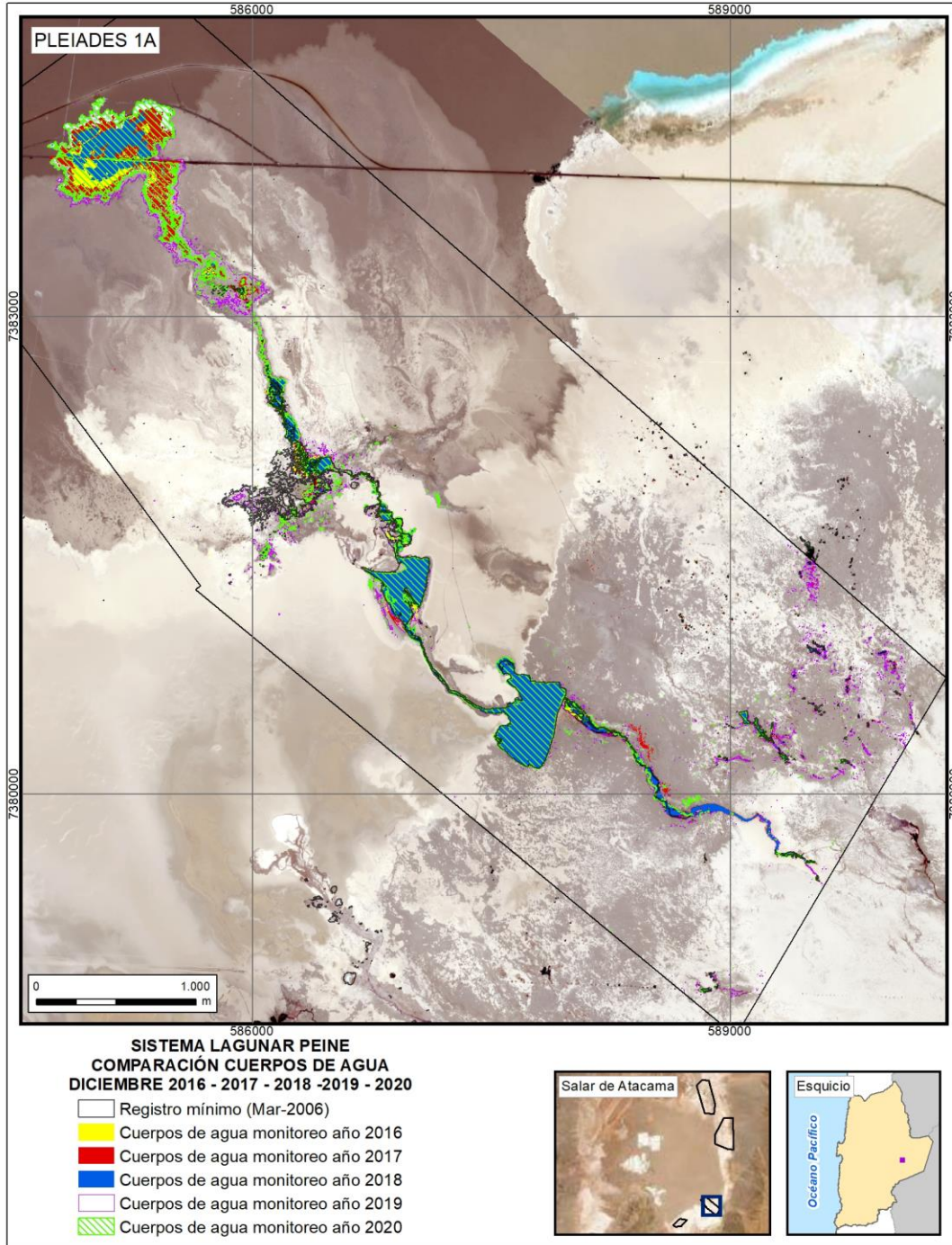
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2020.

Figura N°5-10. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.



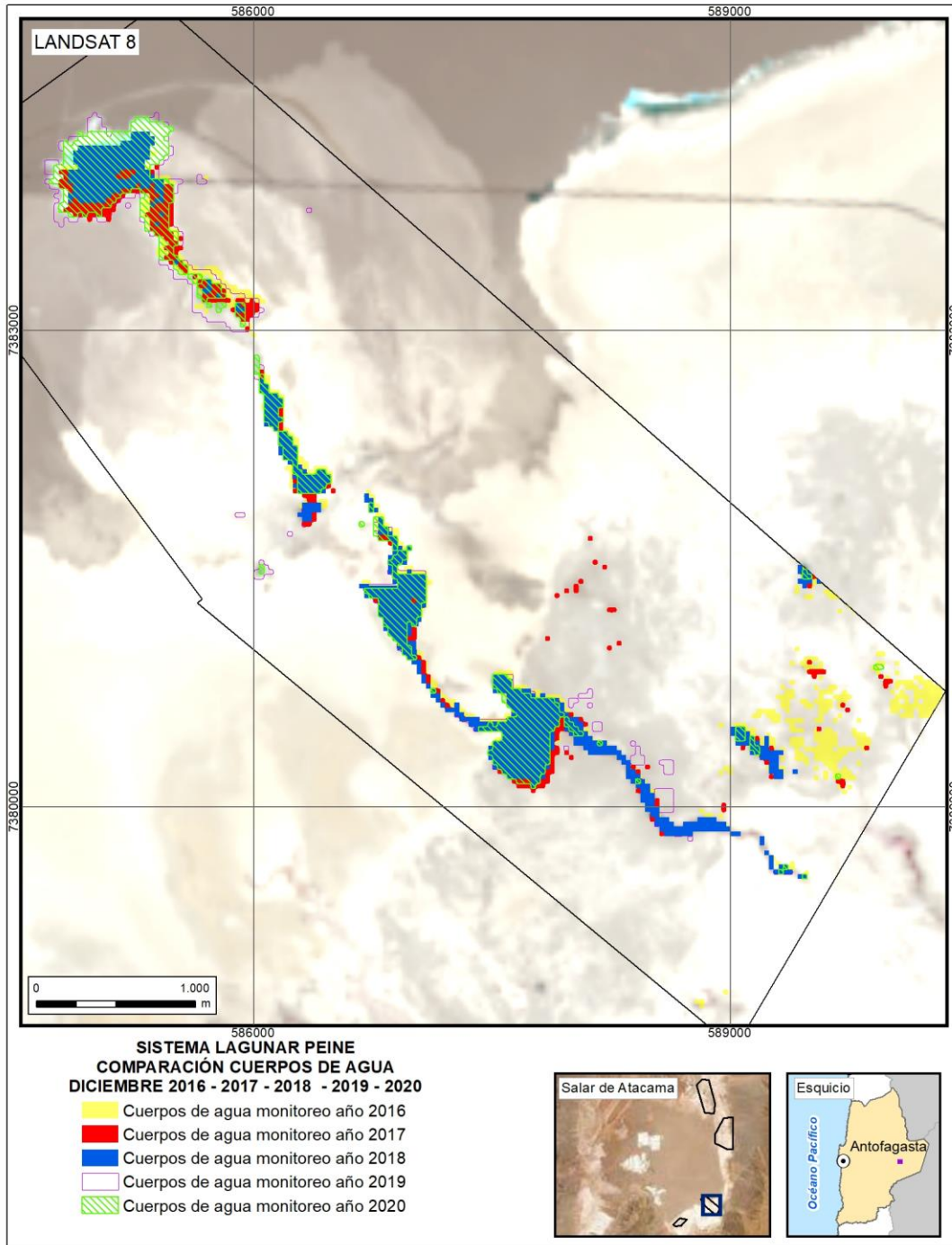
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2020.

Figura N°5-11. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1A.



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2020.

Figura N°5-12. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.

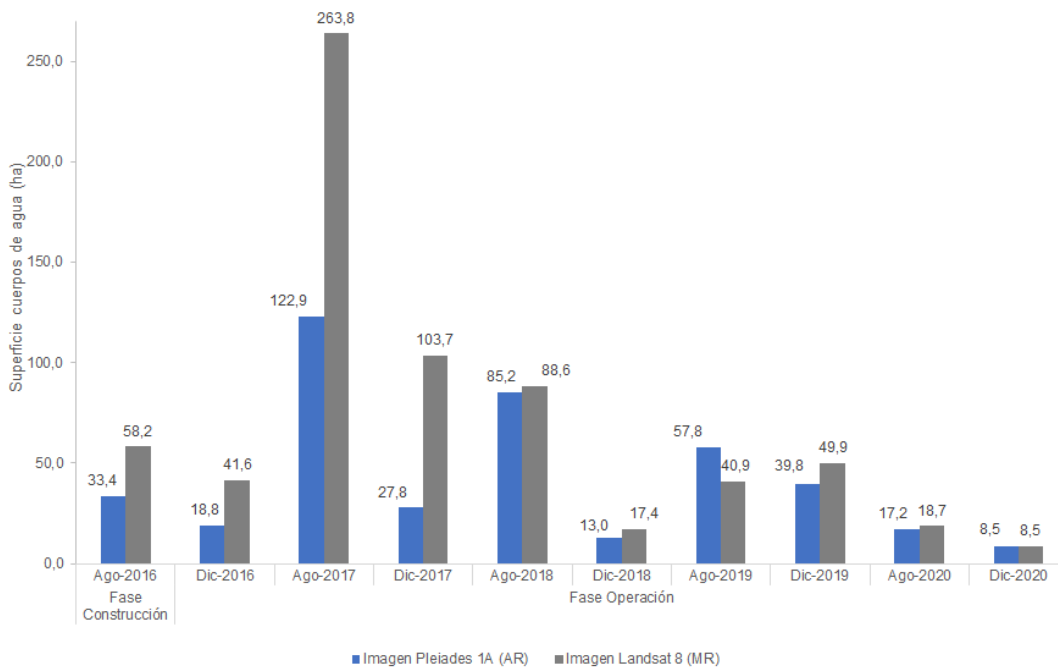


Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a diciembre 2020.

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-1A en agosto de 2020 es de 18,7 ha y en diciembre 2020 abarca una superficie de 8,5 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 2020, 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 (pixel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (pixel 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 18,7 ha en agosto de 2020; estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat 8 sobre Pleiades 1-A de un +8,4% (+1,6 ha) para este periodo. Para las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 8,5 ha en diciembre de 2020, estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat sobre Pleiades de un +0,8% (+0,1 ha) para este periodo. Según los resultados observados por tipo de imagen, se observa que las principales 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. En el caso particular de los resultados del monitoreo de agosto 2017 y diciembre 2017, donde se da la mayor diferencia entre las imágenes Landsat 8 y Pleiades 1A, la mayor resolución y la existencia de extensas zonas inundadas, amplió la superficie de las áreas interconectadas, aumentando la superficie total, en relación a un resultado donde los contornos se ajustaron de mejor manera

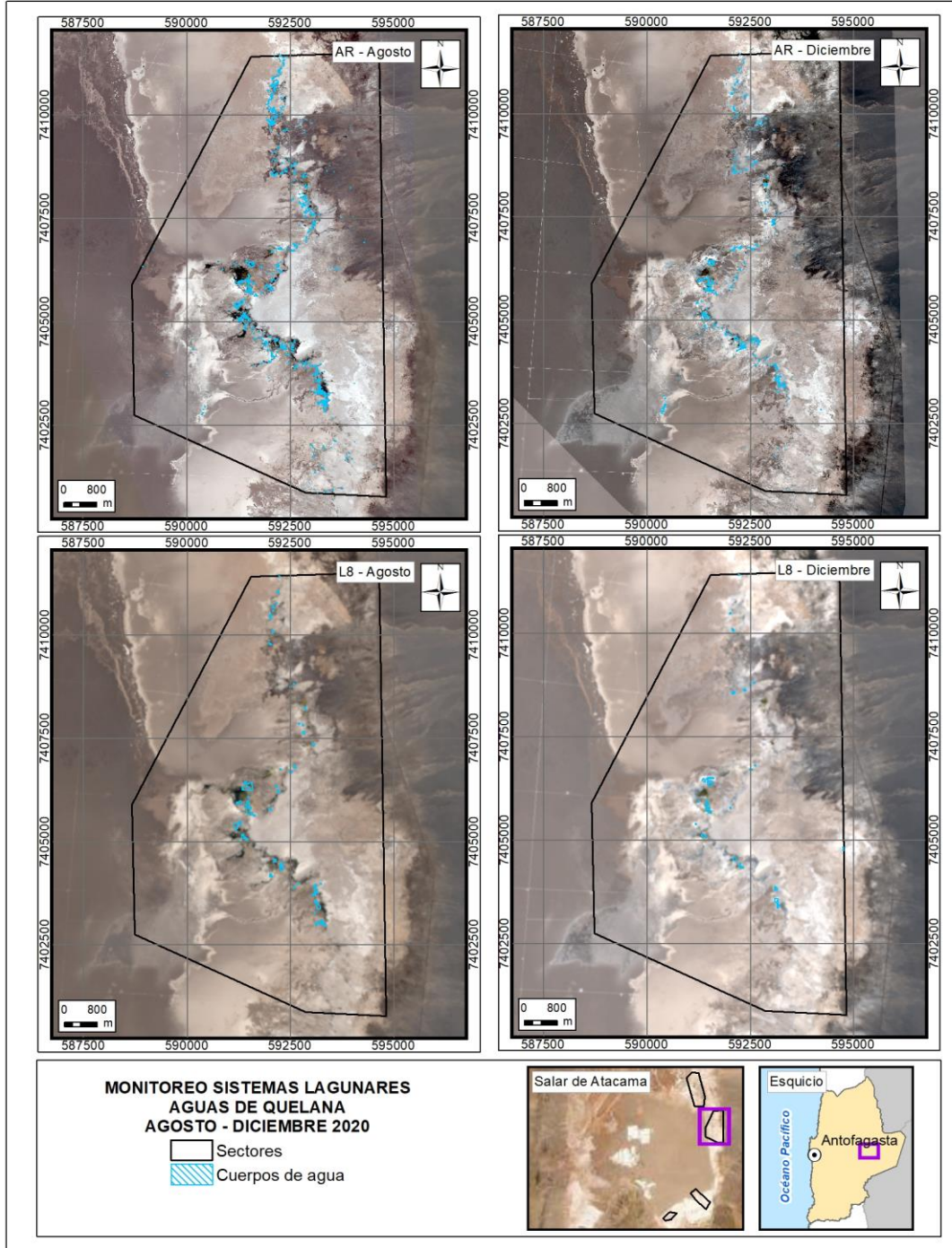
generando una superficie más definida a los bordes, en el caso de las imágenes Pleiades 1A. Sin embargo, el ajuste del modelo en monitoreos sucesivos ha ido acortando las diferencias entre imágenes, llegando a un ajuste en que la variación es del orden de 0,8% en verano 2020. Cabe destacar, que, en el avance de los monitoreos desde agosto 2018 a la fecha, se ha podido disminuir la brecha de diferencia entre ambas imágenes con el robustecimiento de la metodología, basado en el muestreo en terreno y la inspección visual de las imágenes.

La correlación entre las superficies del sector Aguas de Quelana desde 2016 a 2020, 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 0,860¹³ lo que indica una relación positiva alta entre variables; mientras que el valor p es de 0,001 lo que indica que los coeficientes de correlación son significativos.

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 2020, y su representación espacial respectivamente. Las principales diferencias se observan en aumentos significativos de los cuerpos de agua, especialmente de las zonas de rebalse, en los monitoreos de agosto 2017, agosto 2018 y agosto 2019 los cuales pueden ser producto de mayor aporte de lluvias invernales.

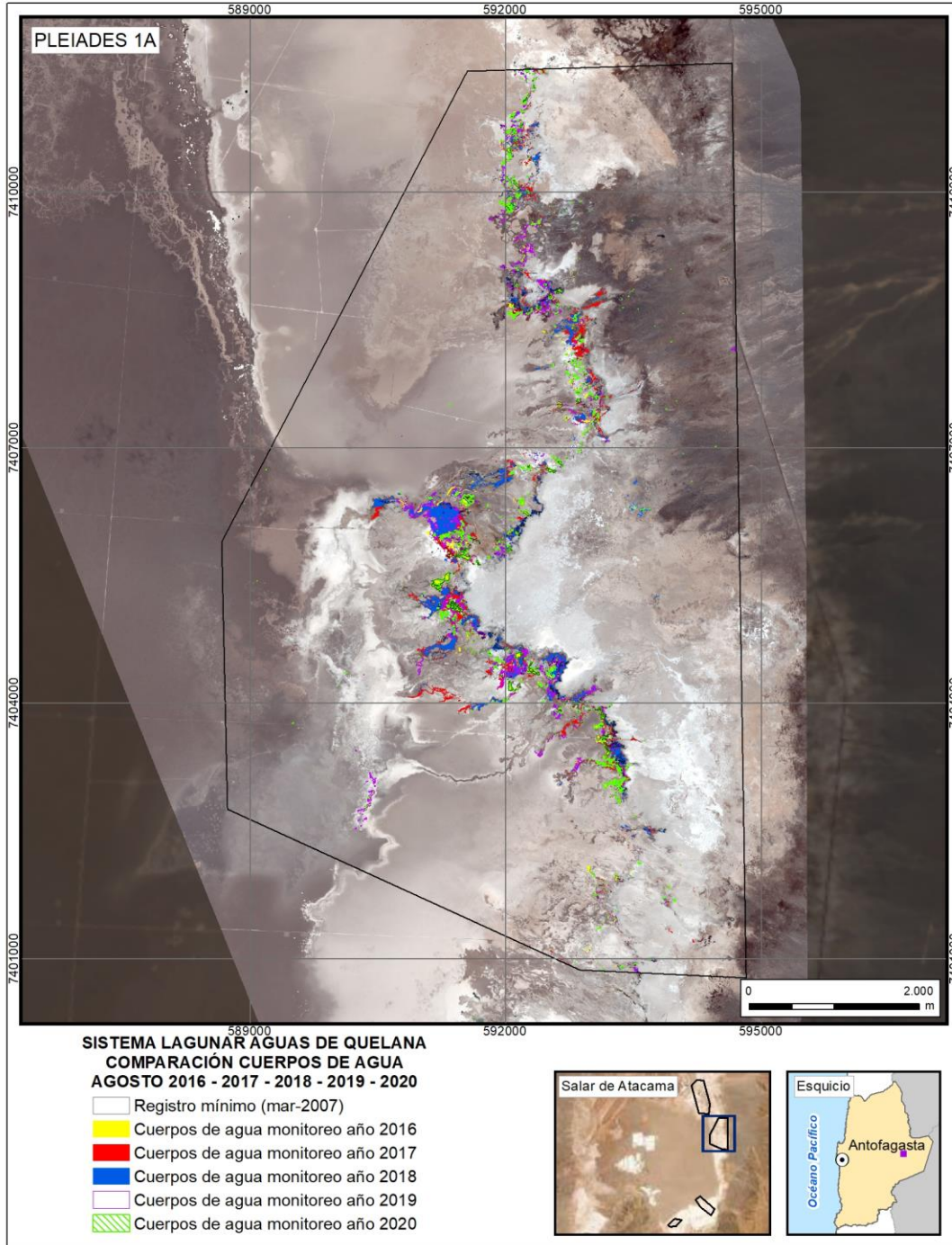
¹³ El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

Figura N°5-14. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Aguas de Quelana, agosto – diciembre 2020.



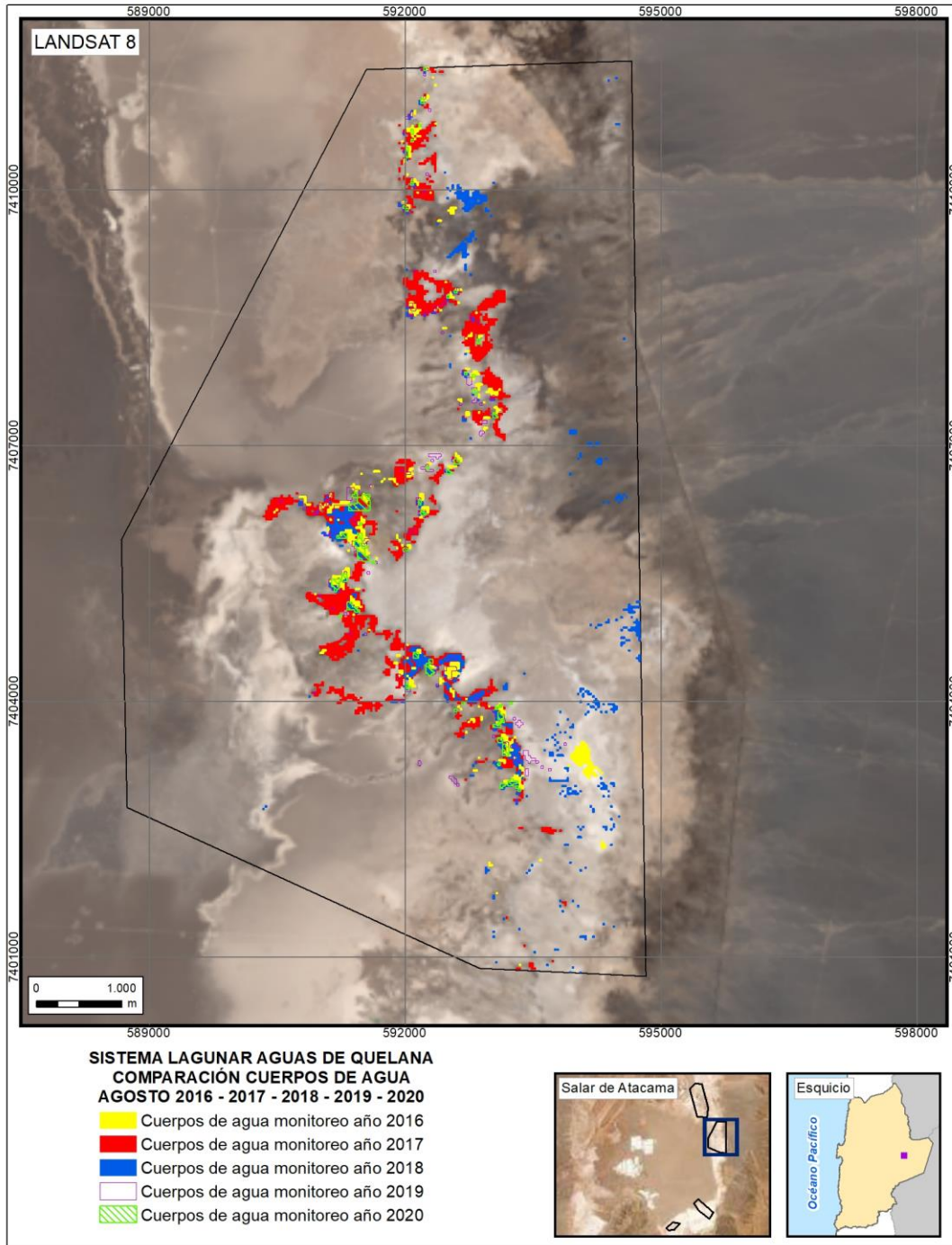
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre 2020.

Figura N°5-15. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Pleiades 1A.



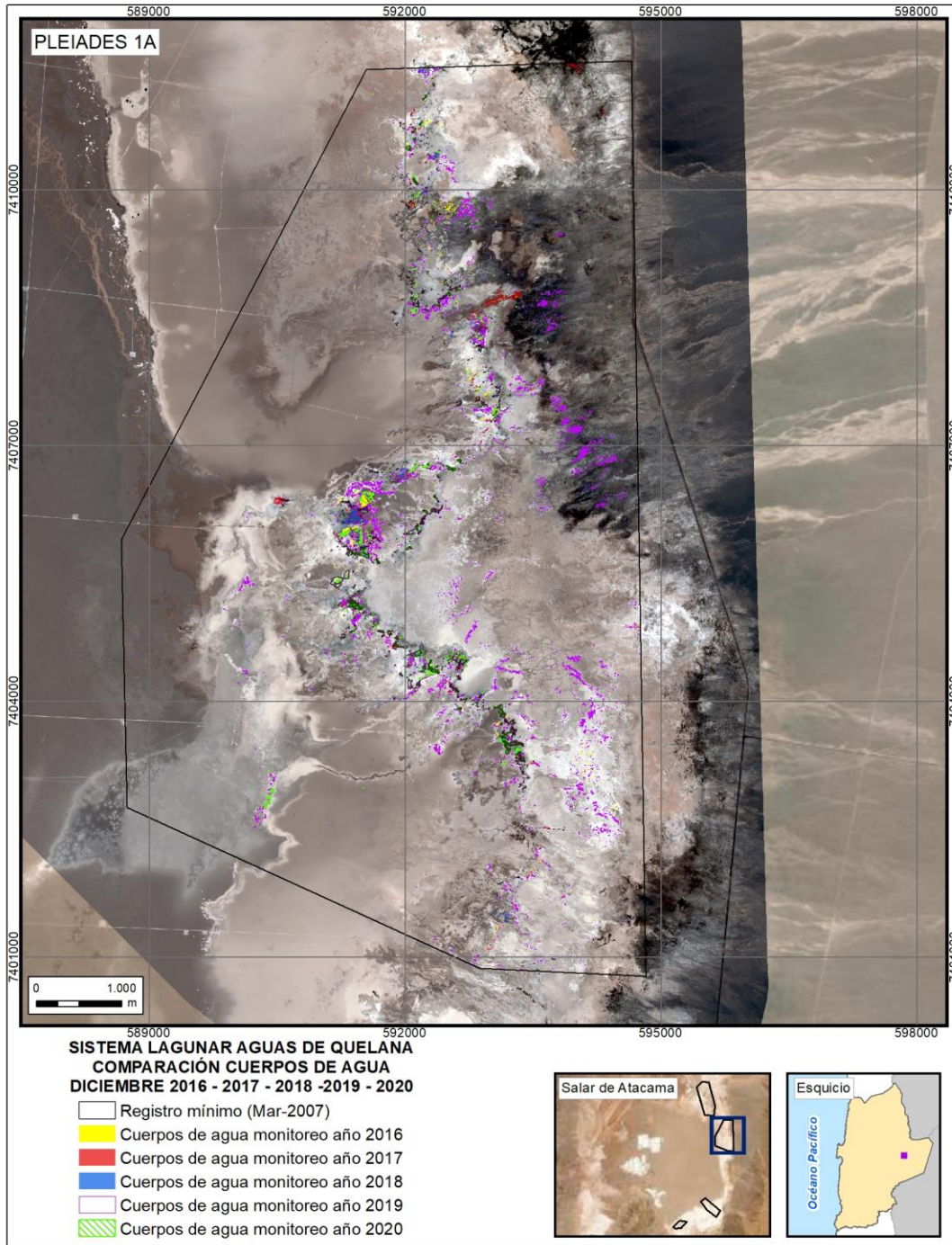
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2020.

Figura N°5-16. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 –2018 – 2019 y 2020, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Landsat 8.



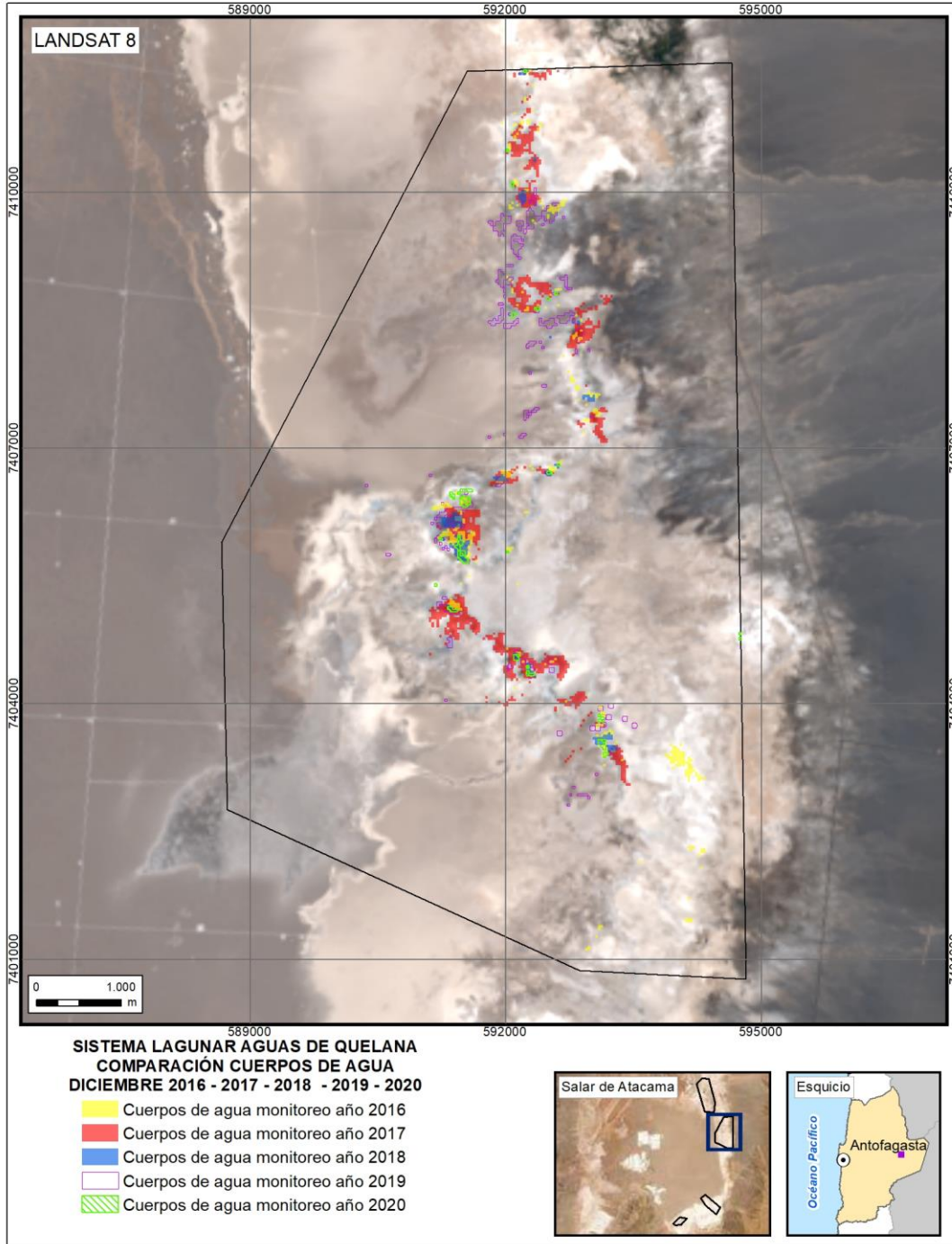
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a 2020.

Figura N°5-17. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Pleiades 1A.



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2020.

Figura N°5-18. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Landsat 8.

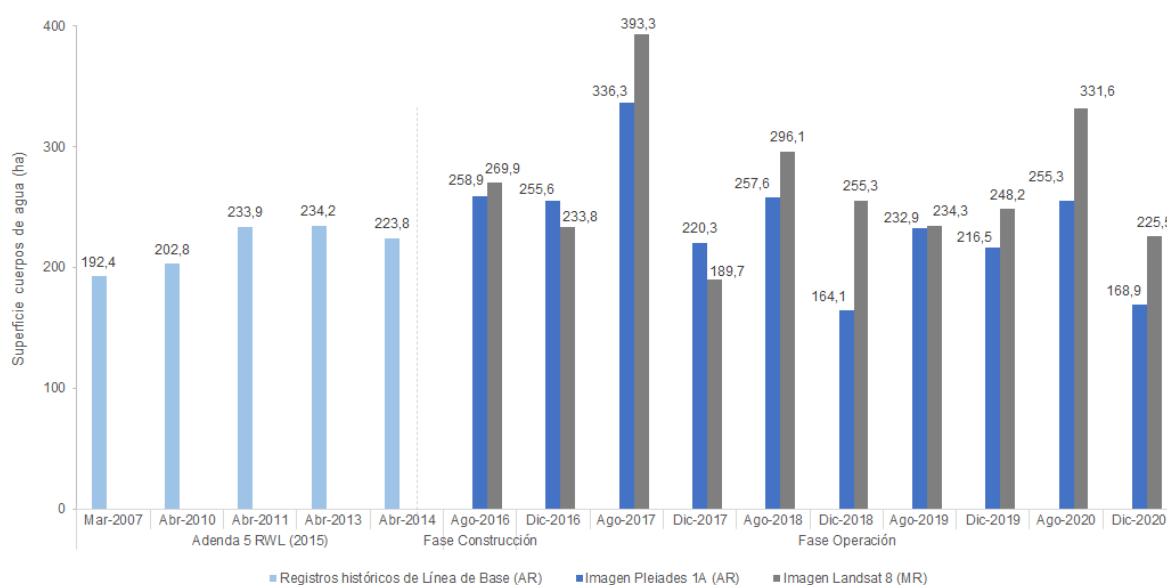


Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2020

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-1A en agosto de 2020 es de 255,3 ha y en diciembre 2020 abarca una superficie de 168,9 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 2020, 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 (pixel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (pixel menor a 4m).

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

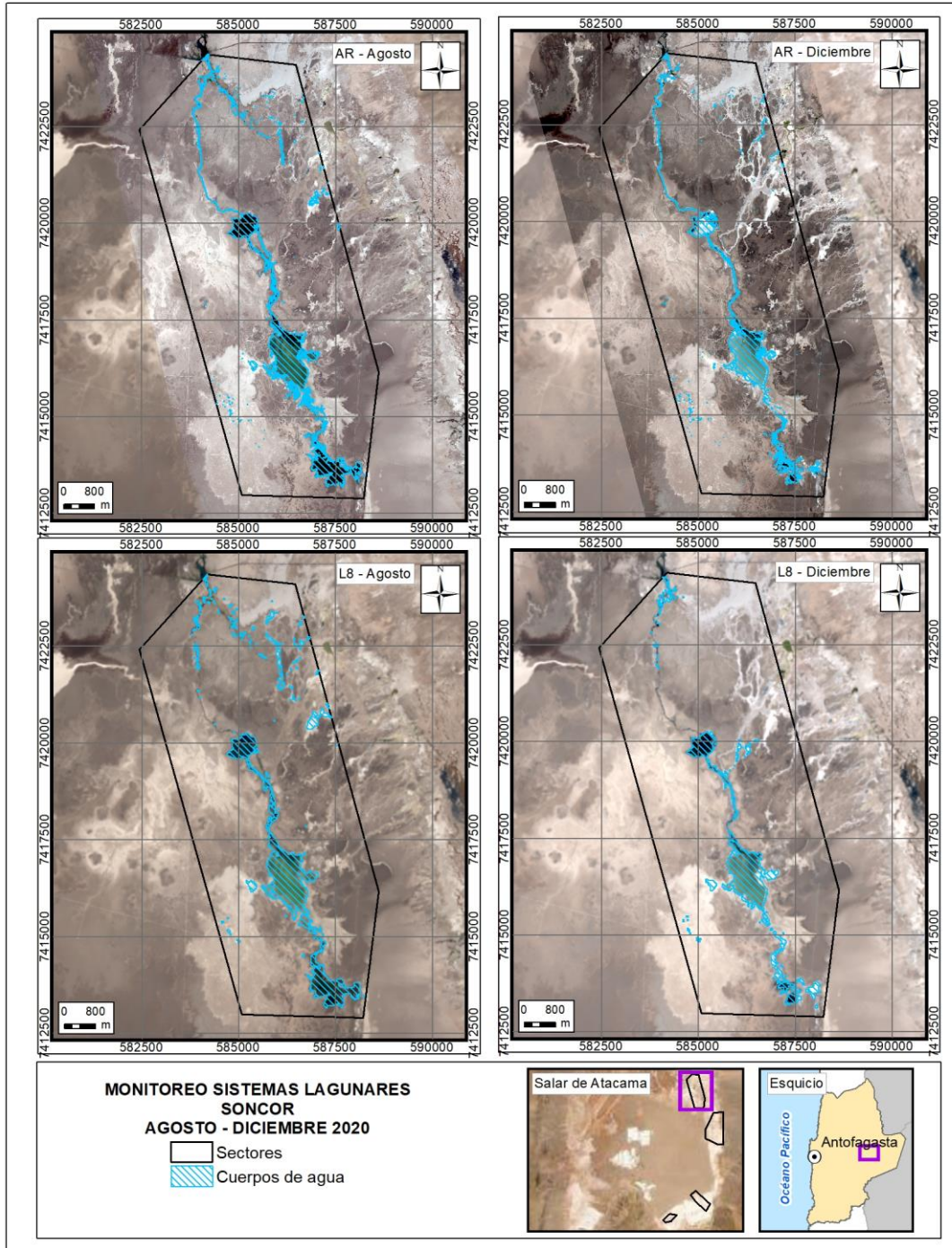
En este sistema lagunar, desde las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 331,6 ha en agosto de 2020 y 225,5 ha en diciembre de 2020. Estos valores en comparación con los verificados para Pleiades 1-A, muestran una diferencia de Landsat sobre Pleiades de un +23,0 % (76,3 ha) para agosto de 2020 y de un +33,5% (56,6 ha) para verano de 2020. Según los resultados observados por tipo de imagen, se observa que las principales 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; 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 son más exactos. Las principales diferencias se dan en el sector sur, en un área en que existe mayor variación, con suelos húmedos, desbordes e interconexión entre lagunas. Los monitoreos con mayor diferencia son agosto 2017, diciembre 2018, agosto 2020 y diciembre 2020, donde en promedio existe 70,3 ha de diferencia, asociados principalmente al área sur.

La correlación entre las superficies del sector Soncor desde 2016 a 2020, 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 0,613¹⁴ lo que indica una relación positiva moderada entre variables; mientras que el valor p es de 0,059 lo que indica que no es concluyente la significancia entre las variables AR 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 2020, y su representación espacial respectivamente. Para el sector de Soncor, las principales diferencias entre monitoreos se observan en los seguimientos de agosto 2017 y agosto 2020, en donde influye las variaciones de la zona sur del sistema, aumentando las superficies calculadas para los cuerpos de agua. Los monitoreos de diciembre 2018 y diciembre 2020, presentan las menores superficies observadas, siempre asociadas a las variaciones cíclicas de la zona sur del sistema.

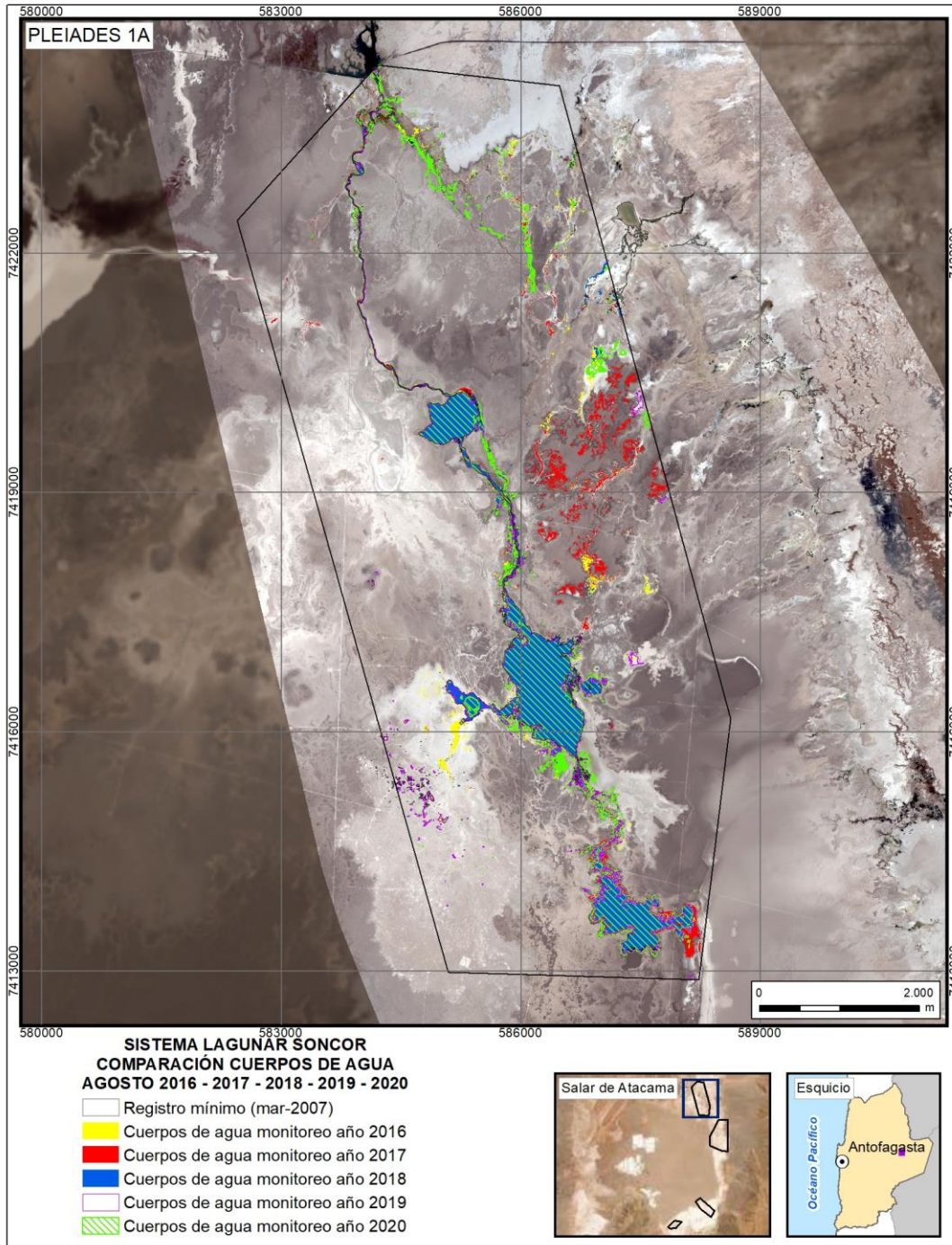
¹⁴ El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

Figura N°5-20. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Soncor, agosto – diciembre 2020.



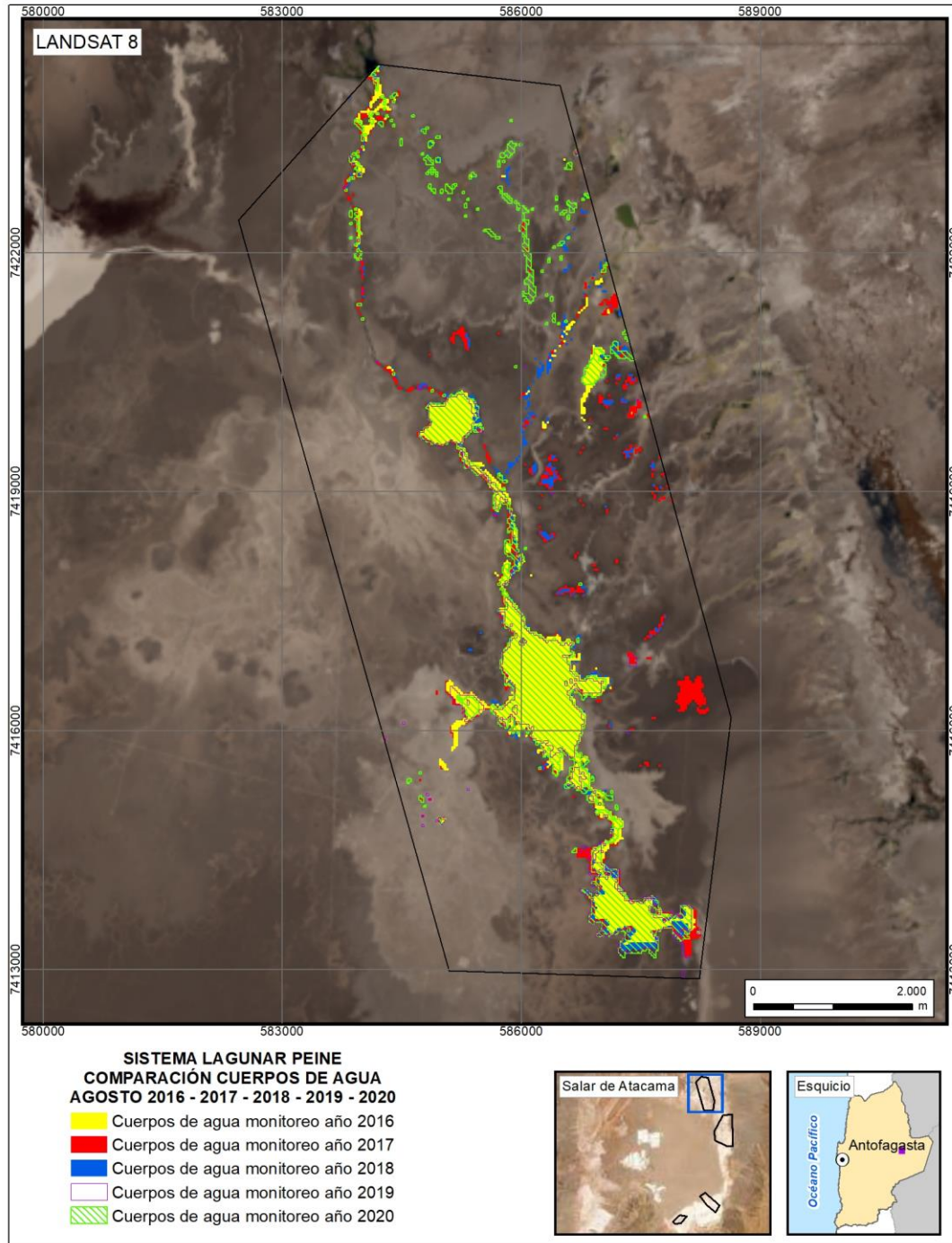
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto y diciembre 2020.

Figura N°5-21. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1A.



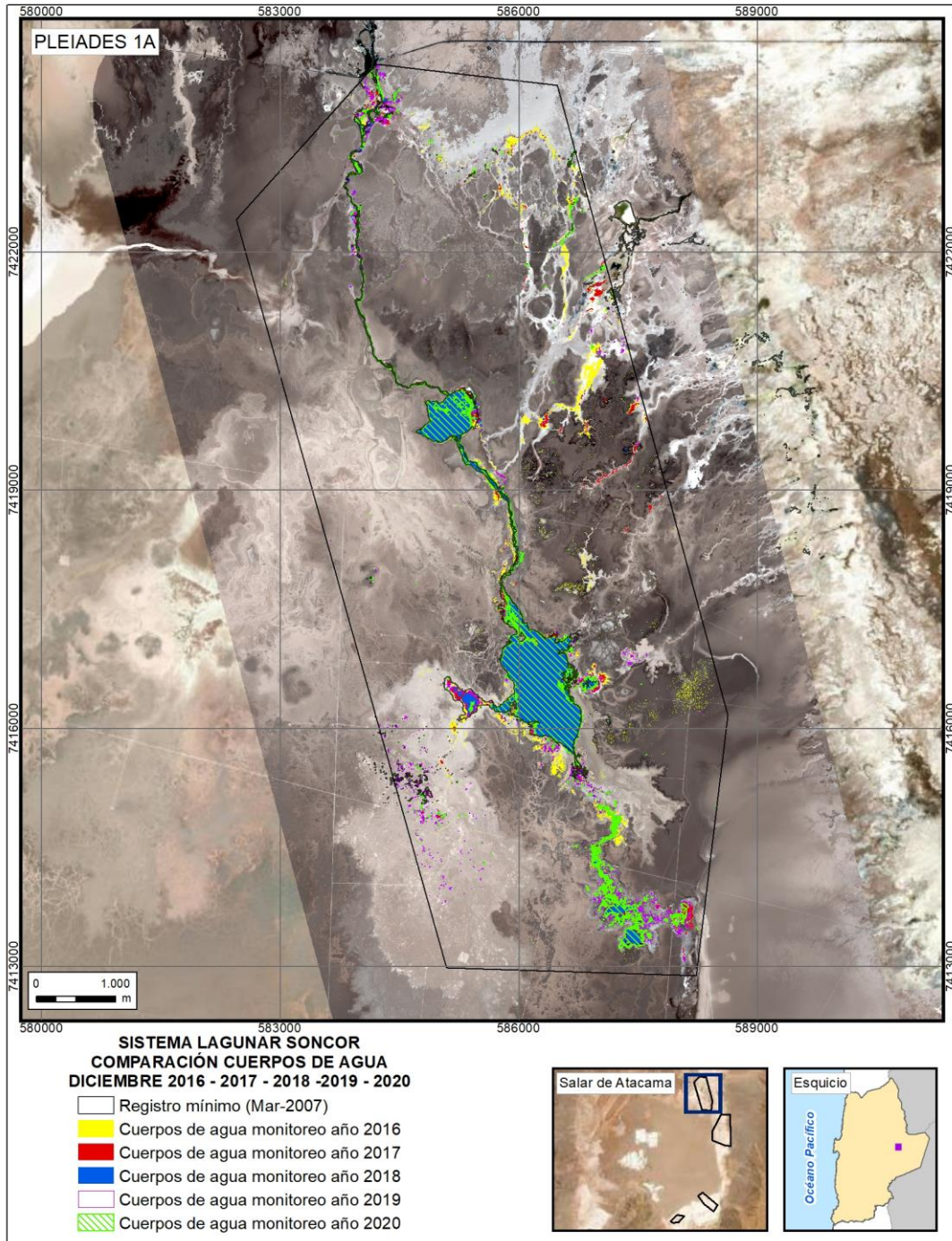
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2020.

Figura N°5-22. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8.



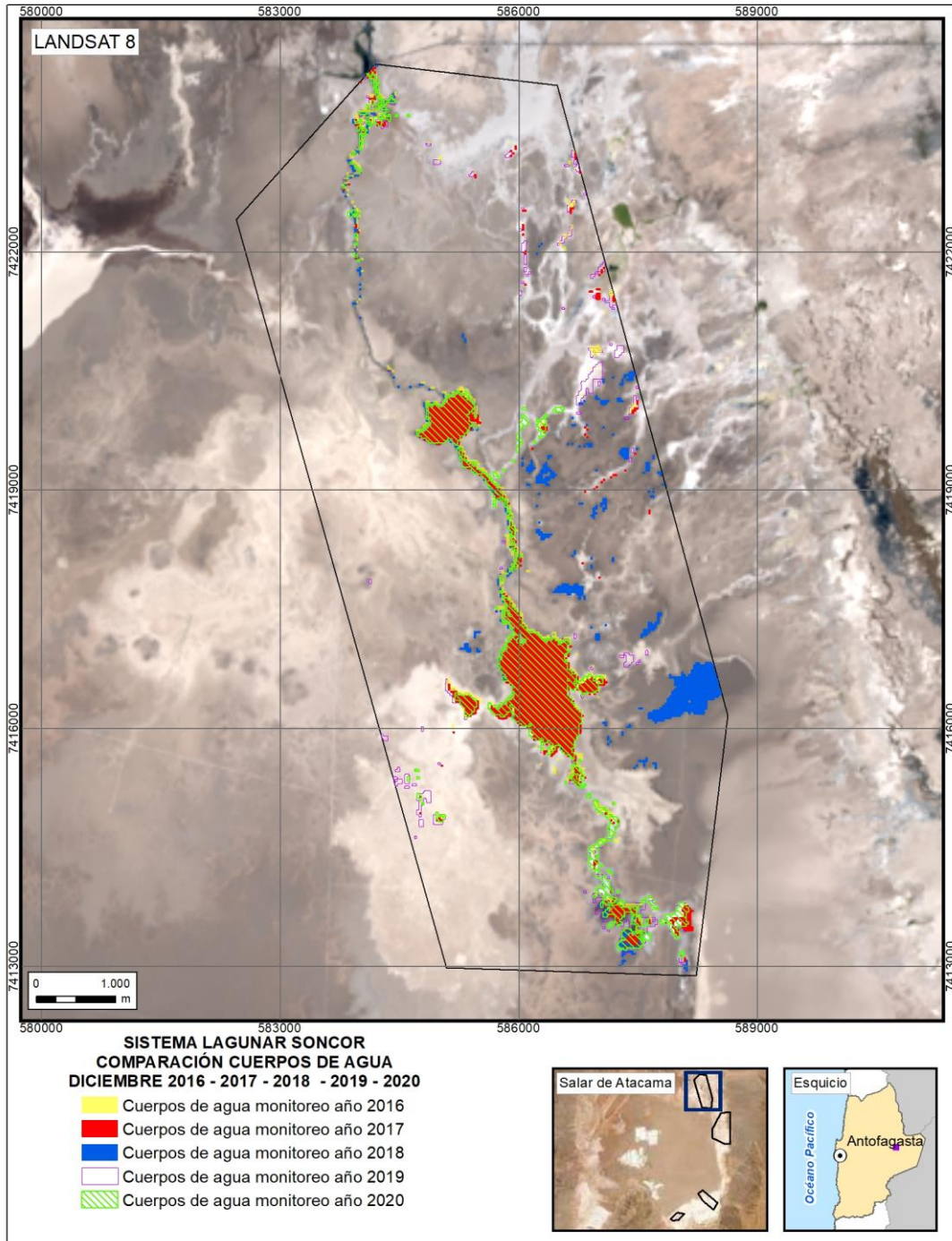
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de agosto 2016 a agosto 2020.

Figura N°5-23. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1A.



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2020

Figura N°5-24. Registros de superficies lagunares de diciembre 2016 – 2017 – 2018 – 2019 y 2020, sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8.



Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016 a 2020

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 *aceptable a casi perfecto*¹⁵ para todos los sistemas lagunares (Tabla N°6-1), con valores promedio del índice *Kappa* para el periodo 2016 – 2020 que van entre 0,90 (Soncor) y 0,68 (Aguas de Quelana y La Punta – La Brava) desde imágenes de alta resolución; con un valor mínimo *aceptable* 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 – 2020 van entre 0,80 (Soncor) y 0,56 (La Punta y La Brava), presentando un valor mínimo de 0,44 en la Punta y La Brava para diciembre de 2020 y un valor máximo de 0,90 para Soncor en diciembre de 2018.

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 macroorganismos, o que en las que se acentúa la discontinuidad de las inundaciones generando parches que no son captados como unidades independientes, aumentando el error en sitios de transición seca - húmeda. Esto último es lo que determino una baja del índice *kappa* en el sector aguas de Quelana y La Punta y La Brava en verano 2020.

¹⁵ 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 y La Brava	Peine	Aguas de Quelana	Soncor
PLEIADES 1A -AR	ago-16	Superficie (ha)	47,4	74,1	33,4	258,9
		<i>Índice Kappa</i>	0,45	0,89	0,72	0,89
	dic-16	Superficie (ha)	40,9	50,2	18,8	255,6
		<i>Índice Kappa</i>	0,82	0,91	0,86	0,90
	ago-17	Superficie (ha)	48,1	74,6	122,9	336,3
		<i>Índice Kappa</i>	0,50	0,86	0,55	0,83
	dic-17	Superficie (ha)	48,6	74,1	27,8	220,3
		<i>Índice Kappa</i>	0,73	0,83	0,59	0,84
	ago-18	Superficie (ha)	61,9	51,5	85,2	257,6
		<i>Índice Kappa</i>	0,78	0,88	0,67	0,85
	dic-18	Superficie (ha)	35,9	49,4	13,0	164,1
		<i>Índice Kappa</i>	0,83	0,80	0,75	0,94
	ago-19	Superficie (ha)	52,8	86,7	57,8	232,9
		<i>Índice Kappa</i>	0,66	0,83	0,66	0,92
	dic-19	Superficie (ha)	62,7	101,7	39,8	216,5
		<i>Índice Kappa</i>	0,79	0,91	0,76	0,95
	ago-20	Superficie (ha)	51,4	54,2	17,2	255,3
		<i>Índice Kappa</i>	0,64	0,96	0,88	0,98
dic-20	Superficie (ha)	28,4	73,5	8,5	168,9	
	<i>Índice Kappa</i>	0,62	0,73	0,37	0,94	
		Promedio Kappa	0,68	0,86	0,68	0,90
LANDSAT 8 - MR	ago-16	Superficie (ha)	62,6	114,7	58,2	269,9
		<i>Índice Kappa</i>	0,47	0,83	0,72	0,78
	dic-16	Superficie (ha)	55,0	110,3	41,6	233,8
		<i>Índice Kappa</i>	0,62	0,83	0,74	0,77
	ago-17	Superficie (ha)	38,2	104,6	263,8	393,3
		<i>Índice Kappa</i>	0,50	0,74	0,71	0,73
	dic-17	Superficie (ha)	39,3	75,3	103,7	189,7
		<i>Índice Kappa</i>	0,54	0,59	0,57	0,82
	ago-18	Superficie (ha)	63,7	78,4	88,6	296,1
		<i>Índice Kappa</i>	0,55	0,73	0,72	0,83
	dic-18	Superficie (ha)	44,4	81,7	17,4	255,3
		<i>Índice Kappa</i>	0,84	0,83	0,63	0,90
	ago-19	Superficie (ha)	53,8	85,1	40,9	234,3
		<i>Índice Kappa</i>	0,54	0,79	0,81	0,81
	dic-19	Superficie (ha)	57,7	107,8	49,9	248,2
		<i>Índice Kappa</i>	0,59	0,76	0,86	0,88
	ago-20	Superficie (ha)	60,0	105,4	18,7	331,6
		<i>Índice Kappa</i>	0,56	0,77	0,80	0,78
dic-20	Superficie (ha)	36,1	83,0	8,5	225,5	
	<i>Índice Kappa</i>	0,44	0,73	0,75	0,72	
		Promedio Kappa	0,56	0,76	0,73	0,80

Fuente: Cedrem Consultores.

6.2 Análisis de comparación con registros históricos de línea de base

Con el objetivo de ir robusteciendo el análisis de la evolución en el tiempo de las superficies lagunares y considerando que durante la evaluación del proyecto se generaron antecedentes que formaron parte de los análisis históricos, es que en este quinto año del PSAH se incluyen como parte del análisis comparativo histórico de las superficies lagunares antecedentes de imágenes Landsat desde 1972 hasta 2014 (presentados durante la evaluación ambiental del proyecto). Lo anterior, también busca explicar la evolución de las superficies obtenidas en estos últimos 5 años de seguimiento de frecuencia semestral y saber si son parte de una variabilidad interanual y/o intranual histórica, considerando además todos los factores que influyen en el funcionamiento lagunar de cada uno de los sistemas. Las imágenes Landsat se suman a las imágenes de alta resolución disponibles, cuyo análisis se incluye también dentro de la presente discusión.

De esta forma, y desde el punto de vista de las imágenes Landsat, se cuenta con los siguientes tres (3) 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.

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 (m^2) de los sistemas lagunares La Punta y 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, 2016-2020, PSAH N°5 (serie complementaria Adenda 5).

Como complemento al análisis anteriormente citado, se agrega en el presente PSAH la serie temporal interanual de los años 2016 a 2020. En este caso, la metodología empleada busca asemejarse a la aplicada en la Adenda 5, es decir, mantiene la referencia a los meses de máxima y mínima extensión lagunar (agosto y diciembre; inviernos y veranos) y la estimación de la superficie lagunar mediante el índice NDWI; sin embargo, la estimación de la superficie lagunar es mediante la realización de “máscaras de agua” es decir, una clasificación binaria en que se obtiene valores de agua y no agua, donde el resultado final es el análisis de la frecuencia de píxeles con valores positivos a agua ($NDWI > 0$, umbral fijado en 0) y su conversión a metros cuadrados (m^2). El valor de umbral fue determinado a partir de la observación de histogramas¹⁶, el muestreo al azar de

¹⁶ Representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados.

píxeles y la verificación de los umbrales usados en los monitoreos de 2016 a 2020. Para todas las imágenes, la automatización del proceso de correcciones radiométrica y atmosférica, se realizó mediante la plataforma de análisis “R”, que se encuentra bajo la Licencia Pública General (GPL) del proyecto colaborativo de software libre GNU. La secuencia de operaciones se ejecutó en un *script*, basados en los paquetes *RStoolbox*, *Landsat*, *Landsat8*, *Rgdal*, *Rgeos*, y *Raster*; este *script* también considero la obtención del índice espectral utilizado (NDWI) y su reclasificación, además del corte de áreas de estudio. Esta metodología se utiliza tanto en el análisis intranual como interanual de las imágenes Landsat 8.

3. Superficie mediante imágenes Landsat, 2016-2020, PSAH N°1 a N°5 (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°4 y del presente informe N°5, 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.

De esta forma, las superficies resultantes del PSAH que se realizan en base a la metodología de clasificación supervisada, 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 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 – 2019), ya que esta última establece los rangos promedios ocupados por cuerpos de agua considerandos por un solo índice (NDWI) en un contexto de larga data.

Si bien las áreas determinadas en base a las imágenes Landsat, poseen diferentes metodologías utilizadas por los diferentes proveedores que las analizaron para Albemarle en su oportunidad, éstas no son limitantes para ampliar la visión general del 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. Por lo tanto, se considera que la información recopilada de Landsat permite tener una visión general del comportamiento histórico y por ello se analiza en su conjunto, para ampliar el espectro de la variabilidad que se tienen de las superficies lagunares en su análisis con imágenes de alta resolución (AR), que vale la pena indicar, corresponden sólo a 4 o 5 imágenes entre los años 2006 y 2015; y que por lo demás, corresponden a las fechas de marzo-abril para los sistemas Soncor, Peine y Aguas de Quelana; y entre enero – abril para La Punta La Brava.

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 9-27. Imágenes Landsat 2019 – 2020 – 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 a 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 y La Brava

- Funcionamiento del Sistema Lagunar

De acuerdo a la información de línea de base, para el funcionamiento lagunas, se tiene que el origen de la alimentación de las lagunas del Sistema La Punta y 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, 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, 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.

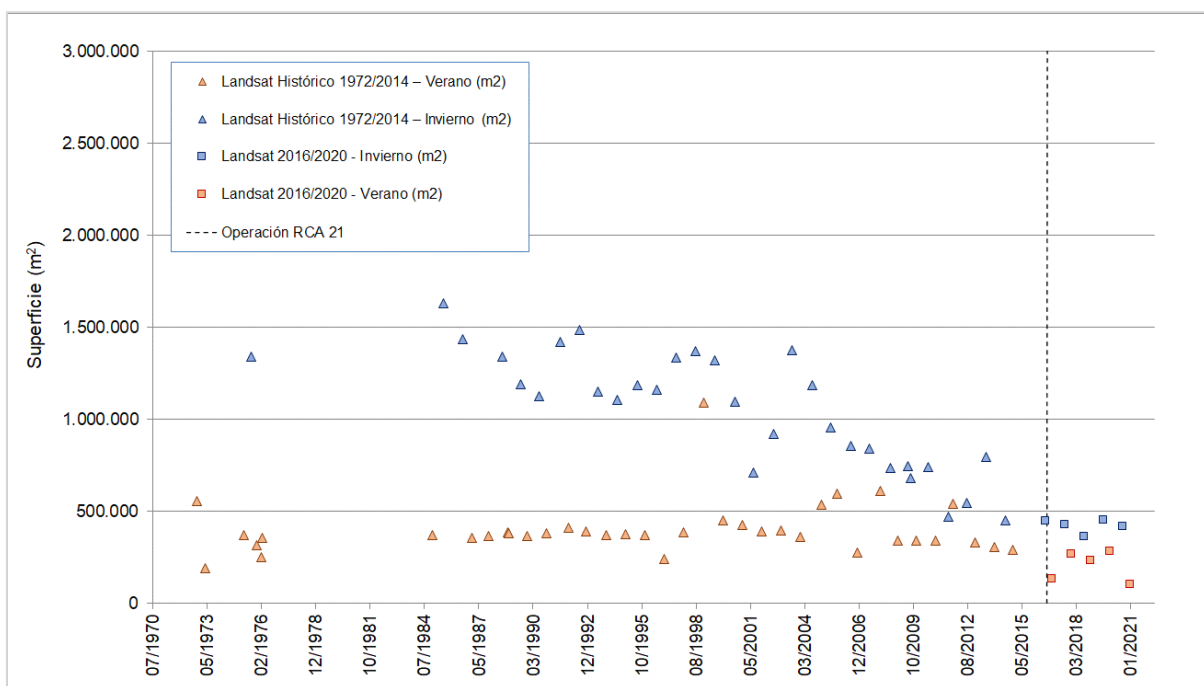
Finalmente, se indica que la superficie de las lagunas está condicionada principalmente por la variación estacional de la evaporación, y en menor medida por la ocurrencia de episodios de lluvia, que lo que provocan es un aumento general de los máximos y mínimos anuales en función de si se está en un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

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

En la Figura N° 6-1 se presenta la serie histórica entre los años 1972 y 2020 de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes satelitales Landsat, asociadas al índice NDWI. En ella se puede observar que la máxima extensión de las lagunas se produce durante los meses de invierno (indicados en colores celestes y azules en la imagen); y con los registros más bajos en general en verano, dándose en marzo 1973, diciembre 1996, diciembre 2006, diciembre 2016, diciembre 2018 y diciembre 2020.

Si bien se observa una tendencia histórica al descenso de las superficies asociadas a los inviernos (julio – agosto), las superficies registradas en los veranos (enero – febrero, diciembre) presentan estabilidad en sus valores a excepción de un evento de alza en enero del año 1999. 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.

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

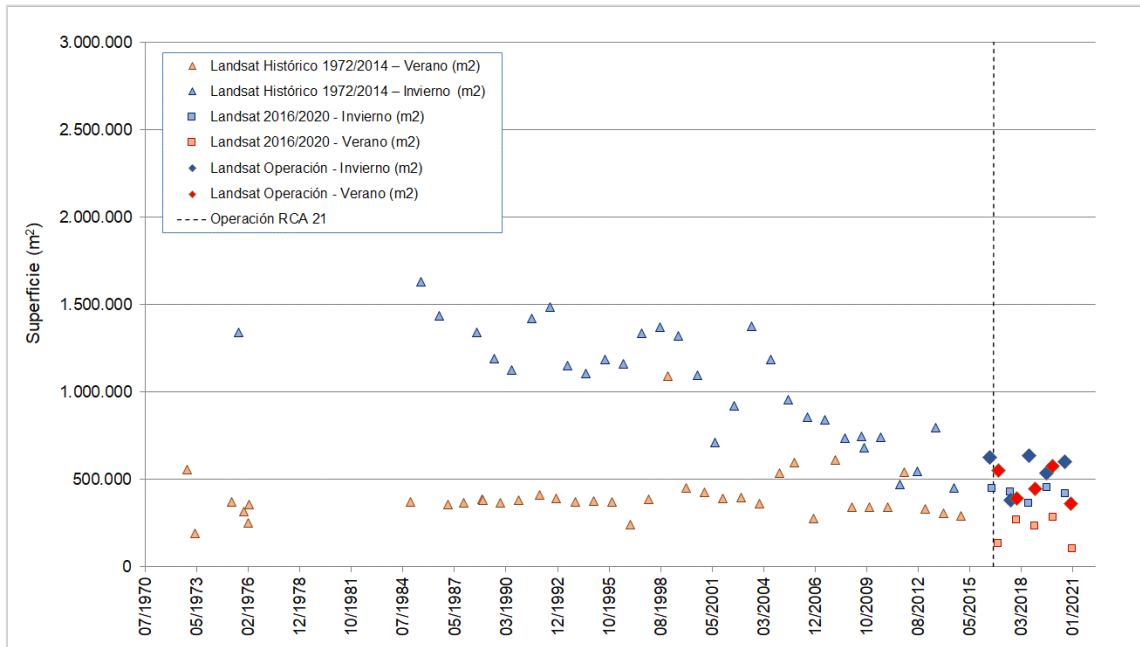
- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación a las superficies históricas (serie Adenda 5 y serie complementaria)

Los registros de superficies calculadas con Landsat observadas durante el monitoreo 2016 a 2020, 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 y La Brava y similares a los datos históricos, tanto en invierno y verano, considerando las superficies históricas y también las superficies Landsat de los últimos años 2008-2014, 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 y análisis visual, 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 y 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

- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

Con respecto a las variaciones intranuales, en la Figura N° 6-3 se observa la variación de las superficies lagunares considerando el índice NDWI, desde imágenes Landsat, durante los años 2013 – 2014 (presentadas en proceso de evaluación del Proyecto como Línea de Base) y se ha realizado para efectos del presente análisis el ejercicio para el período jul 2019 – dic 2020 y su relación con las precipitaciones en estación meteorológica de la Planta Albemarle. De este análisis intranual se puede apreciar que para los años 2013-2014 existió aumento de las superficies desde fines de mayo hasta agosto 2013 (otoño – invierno) y una disminución de los valores desde noviembre 2013 hasta marzo 2014 (primavera – verano), posterior a esa fecha, las superficies retomaron el alza subiendo hasta el siguiente invierno 2014. Para la serie intranual 2013 - 2014 se observaba una cierta correspondencia o sincronía entre la superficie lagunar y las variaciones mensuales de precipitación durante ese año.

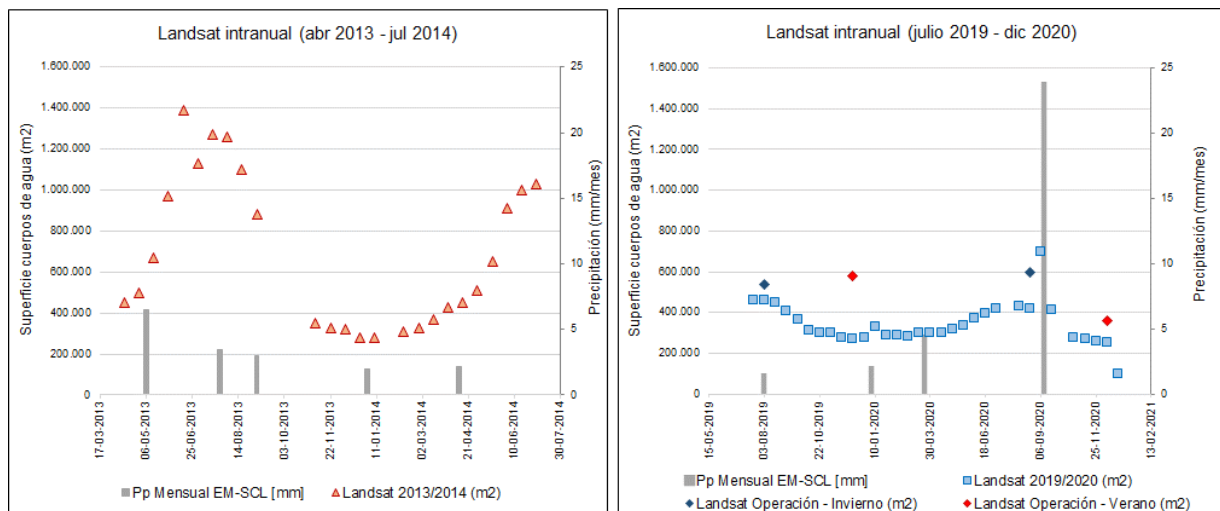
En el caso de los años 2019-2020, si bien también se observa aumentos de superficie lagunar en invierno y descensos en período de verano, la amplitud de la variación es mucho más pequeña y no se observa una correspondencia directa con la precipitación de la estación meteorológica, que fue mucho más abundante en el invierno, sino más bien una respuesta puntual y de corto plazo, dado por el abrupto

aumento de la superficie producto de la precipitación caída en invierno en agosto 2020 (23,8 mm). Posterior a ello, la superficie lagunar retoma la tendencia previa al evento de lluvia.

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”. 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 2019 – 2020, 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 y la Brava.



Fuente: Elaboración Propia

- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

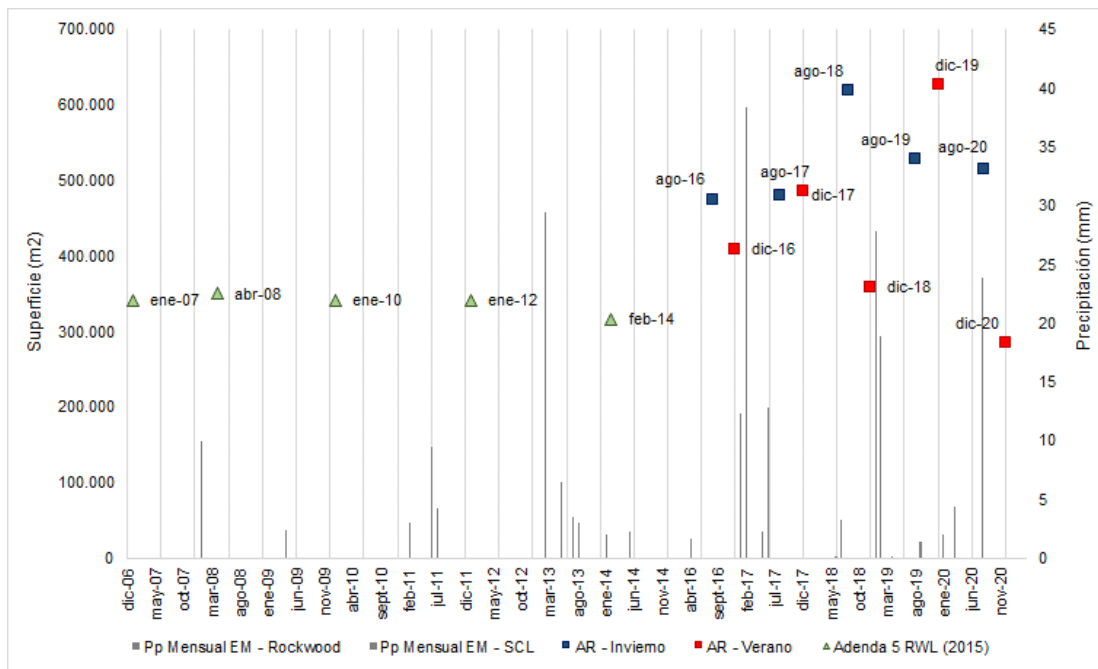
Con respecto a la variación de las superficies lagunares semestrales del PSAH, en la Figura N° 6-4, se presentan las imágenes de alta resolución para el sector de La Punta y la Brava, junto a las superficies históricas en AR (Adenda 5 RWL, 2015). Las superficies semestrales desde imágenes de alta resolución del PSAH, se presentan sobre los históricos, a excepción del mes de diciembre de 2020. 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.

Los aportes de precipitaciones en el periodo 2016 – 2020, los cuales se presentaron en general en los meses de enero -febrero y mayo - junio; de las mayores superficies medidas en AR, solo una se asocia temporalmente a lluvias invernales (agosto de 2018) que coincide temporalmente con las lluvias de junio y julio de 2018 (3,5 mm acumulados).

Por otra parte, las menores superficies registradas de diciembre de 2018 y diciembre de 2020, no presentan lluvias asociadas y ambas están precedidas de tres meses de nula precipitación. 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 de línea de base de AR (Figura N° 6-4) 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° 6-1). Existen periodos más largos en los que no hay registro de precipitaciones que no alteran mayormente el ciclo de variación invierno – verano (Figura N° 6-4).

En general, las variaciones estacionales con inviernos de mayor área de ocupación lagunar y veranos con menor superficie lagunar, puede observarse tanto en las series de las imágenes de alta resolución como las de media resolución, pero en la serie de alta resolución no se observa una diferencia constante entre inviernos y veranos, siendo más amplia o más acotada, sin un patrón fijo. Sin perjuicio de lo anterior, para ambas fuentes (AR y Landsat) se tiene que los rangos de superficies lagunares para el Sistema La Punta –La Brava, en el periodo 2016-2020, varía en general entre 300.000 m² a 600.000 m², lo cual está dentro del rango observado tanto para AR como para Landsat del último período histórico 2008-2014.

Figura N° 6-4. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar La Punta y 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), 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° 6-5) lo cual se corrobora con el análisis intranual año 2019-2020 de la misma Figura.

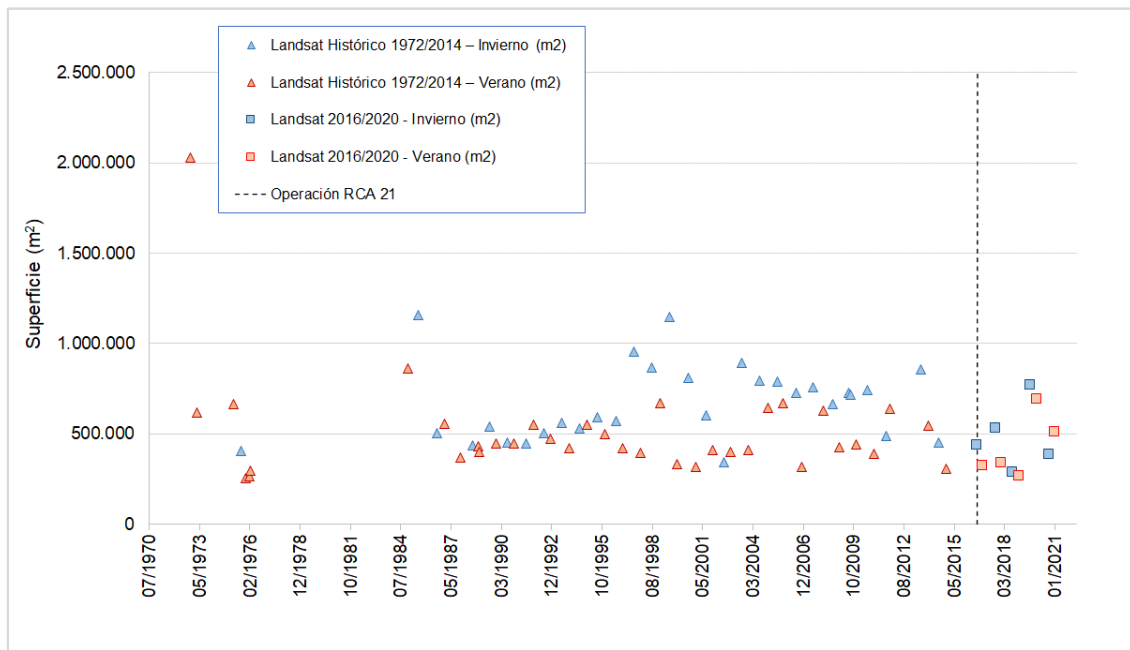
De la línea base y funcionamiento de las lagunas presentado en la Adenda 5, se tiene de los datos y análisis químicos e isotópicos que, *“las lagunas Saladita e Interna presentan una estrecha relación con el régimen de precipitaciones de la zona, enriqueciéndose isotópicamente en verano y empobreciéndose 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 y serie complementaria)

En la Figura N° 6-5, se presenta la serie histórica (1972 – 2020) de imágenes de mediana resolución. En la serie, se puede observar que la máxima extensión de las lagunas se produce principalmente durante los meses de invierno, siendo los años con mayor superficie en julio 1985 y julio de 1999. En el último tiempo (2016-2020) se observa una menor diferencia entre las superficies de los periodos de invierno y verano, manteniéndose estable y por sobre los valores históricos.

La tendencia de las superficies asociadas a los inviernos (julio – agosto), en triángulos celestes, muestran un ascenso desde 1972 a 1998, luego un descenso hasta el 2014 y finalmente una variación no concluyente entre 2016 a 2020. Por otro lado, la tendencia de las superficies reportadas en verano, se muestra a la baja en la serie histórica hasta 1998, desde ahí muestra variabilidad y en la serie complementaria muestra un aumento en los 2 últimos veranos.

Figura N° 6-5. 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

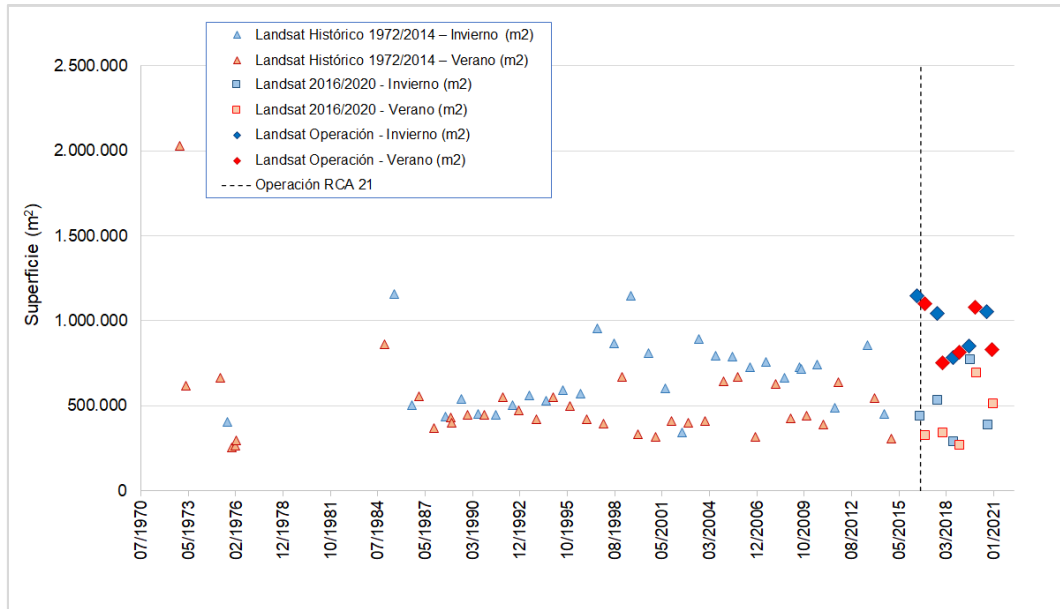
- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación con las superficies históricas (serie Adenda 5 y serie complementaria)

En la Figura N° 6-6 se presentan las superficies lagunares determinadas en el PSAH entre los años 2016-2020, en relación a las superficies históricas determinadas mediante NDWI – Landsat (1972-2020). En la figura se observa que las superficies reportadas para el PSAH se encuentran dentro del rango histórico, y que a su vez son superiores a las determinadas mediante la metodología NDWI – Landsat en el periodo 2016-2020.

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 y análisis visual, 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. En particular para el sector de Peine, resulta relevante mencionar que la laguna Interna, ubicada al final del sistema lagunar de acuerdo con la dirección del flujo, resulta ser una laguna terminal de gran superficie en relación con la superficie total del sector Peine, cuya fisonomía está determinada de manera importante por la presencia de sales. En ese sentido, la validación en terreno implementada en el marco del PSAH ha sido fundamental para mejorar la delimitación de este sistema lagunar, en particular en la laguna Interna, proceso que no ha sido considerado en la metodología NDWI-Landsat, pudiendo implicar en este caso una subestimación del área total del sector Peine (series históricas NDWI Landsat).

Los registros de superficies calculadas con Landsat, reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2020 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 - 2020. Para los años 2016, 2017 y 2020 las superficies de invierno reportadas se encuentran en el rango de las superficies máximas, mientras que las superficies reportadas para los veranos están sobre los registros máximos y mínimos para la temporada.

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



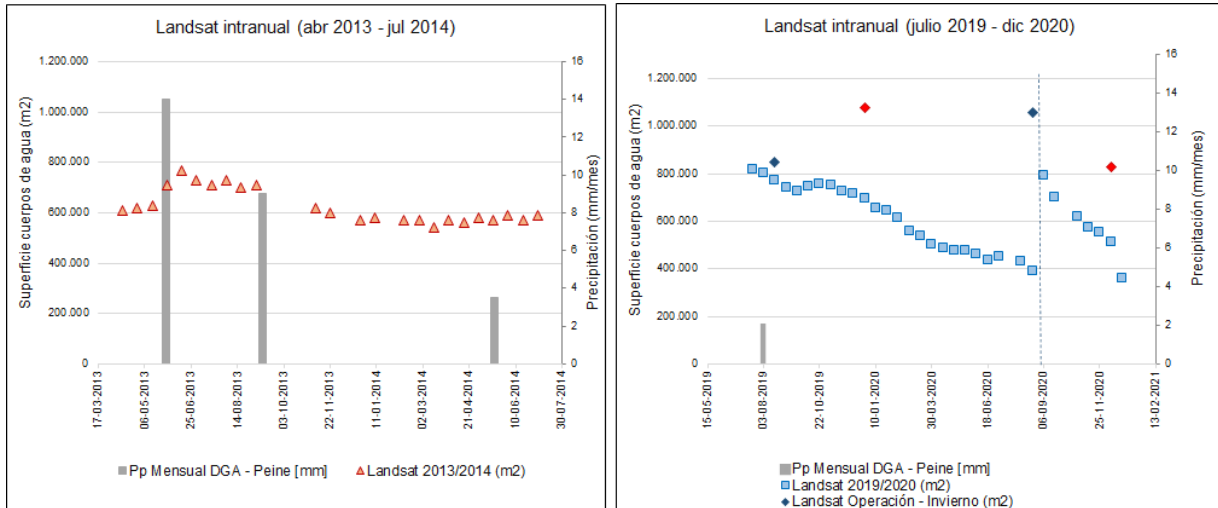
Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

Con respecto a las variaciones intranuales para el sector Peine, en la Figura N° 6-7 se observa en el gráfico del 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, mismo análisis pero para años 2019 – 2020 y junto con ello las precipitaciones de la estación meteorológica Peine (DGA). 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 2019-2020 con un rango de variabilidad de 600.000 m².

Se observa un leve aumento de las superficies lagunares de Peine desde fines de mayo de 2013 hasta septiembre de 2013 (otoño – invierno), manteniéndose el resto del periodo con superficies en valores similares (noviembre 2013 a julio 2014). En el caso de los años 2019-2020, la serie de NDWI muestra las superficies más altas entre julio de 2019 y enero 2020 (mostrando un amplio periodo de máximas superficies), fluctuando a la baja entre febrero de 2020 y agosto de 2020, con una fuerte alza en septiembre de 2020, para volver en la fluctuación a la baja hasta fines de 2020. Este ascenso de la superficie es producto de las precipitaciones acontecidas en agosto 2020, que lamentablemente la estación Peine de la DGA no tiene registro, pero que si se puede observar en la Figura N° 6-3 y Figura N° 6-8, estación SCL- y cuya respuesta del sistema lagunar denota la directa relación entre las precipitaciones y la variación de la superficie lagunar.

Figura N° 6-7. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Peine.



Dónde: der., Línea punteada: referencia precipitaciones sin registro DGA - Peine, agosto 2020.

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 Peine (Figura N° 6-8), se puede observar sólo en el año 2016 una cierta variabilidad estacional reflejada por una diferencia entre el área de invierno con la de verano. Sin embargo, para el resto de los años 2017 a la fecha, las áreas resultan ser muy similares, en donde incluso las áreas de verano resultaron ser superiores a las de invierno en el 2019 y 2020. Lo anterior, junto con los resultados de superficie desde imágenes Landsat, corrobora el modelo conceptual planteado durante la evaluación del proyecto, respecto a que en general no se observa una variación estacional de la superficie lagunar Peine por influencia de la evaporación.

En relación con las magnitudes de las superficies históricas en AR (Adenda 5 RWL, 2015), las superficies semestrales del PSAH se presentan sobre el mínimo históricos AR (489.000 m²), con una cobertura en agosto de 2020 que es mayor en +53.000 m² (10,8%) y en diciembre 2020 es mayor en +246.000 m² (50,2%). 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.

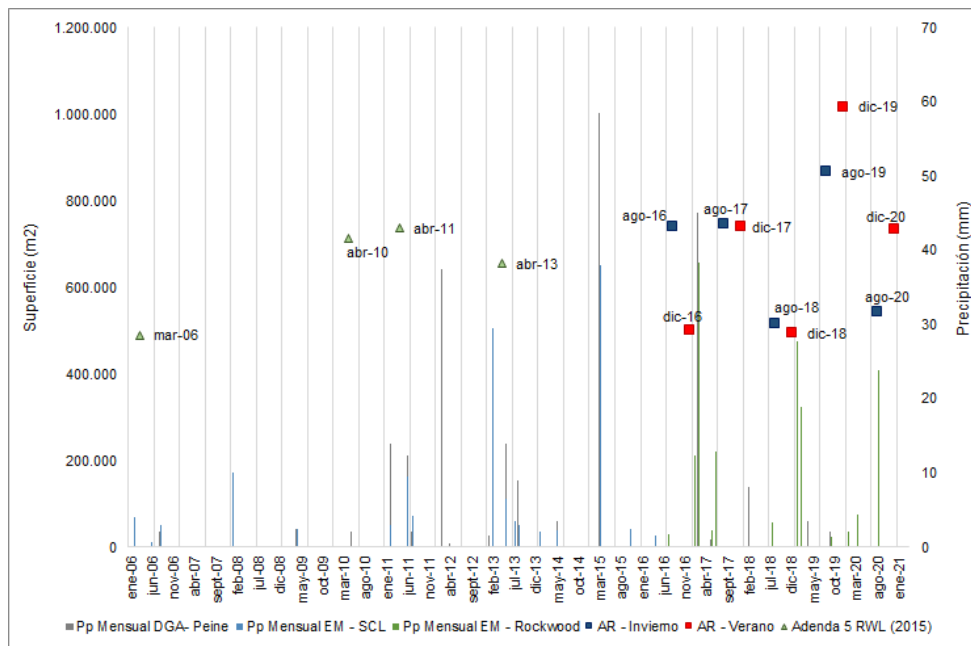
Con respecto a las precipitaciones para el sector¹⁷, y considerando las precipitaciones registradas por estación Peine y en los últimos años la estación de Albemarle, observando la Figura N° 6-8, se

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; por lo tanto, se agregan datos de las estaciones meteorológicas Planta Albemarle para contextualización.

desprende que las de mayor aporte no siempre se relacionan temporalmente a 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 precipitaciones reportadas por la estación meteorológica ubicada en la Planta Albemarle, muestra un aumento de las precipitaciones en los meses de enero a junio de 2017 con 65,7 mm acumulados para el periodo (la estación DGA – Peine reporta para febrero de 2017, 45 mm acumulados), que no tiene un efecto directo en las superficies de agosto y diciembre de 2017, que se presentan dentro del rango estimado para el sector. Por otro lado, las precipitaciones de enero a abril de 2019 con 46,8 mm acumulados (5,5 mm acumulados según DGA – Peine), podría relacionarse con un aumento de las superficies de los reportes semestrales de agosto y diciembre 2019; sin embargo el volumen es menor a otras cifras reportadas que no han resultado en un alza en las superficies de los cuerpos de agua del sector. Finalmente, los reportes de agosto 2020 con 23,8 mm., pudieron significar un aumento de las superficies reportadas en diciembre 2020. Lo anterior, muestra diversas respuestas y variaciones puntuales de superficies asociadas en algunos casos a eventos de precipitaciones, pero no siempre, lo que indica una cierta relación de ambas variables pero si duda que existen otros factores que también inciden, como la evapotranspiración y los niveles subsuperficiales.

Figura N° 6-8. 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, “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 las mismas, 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.

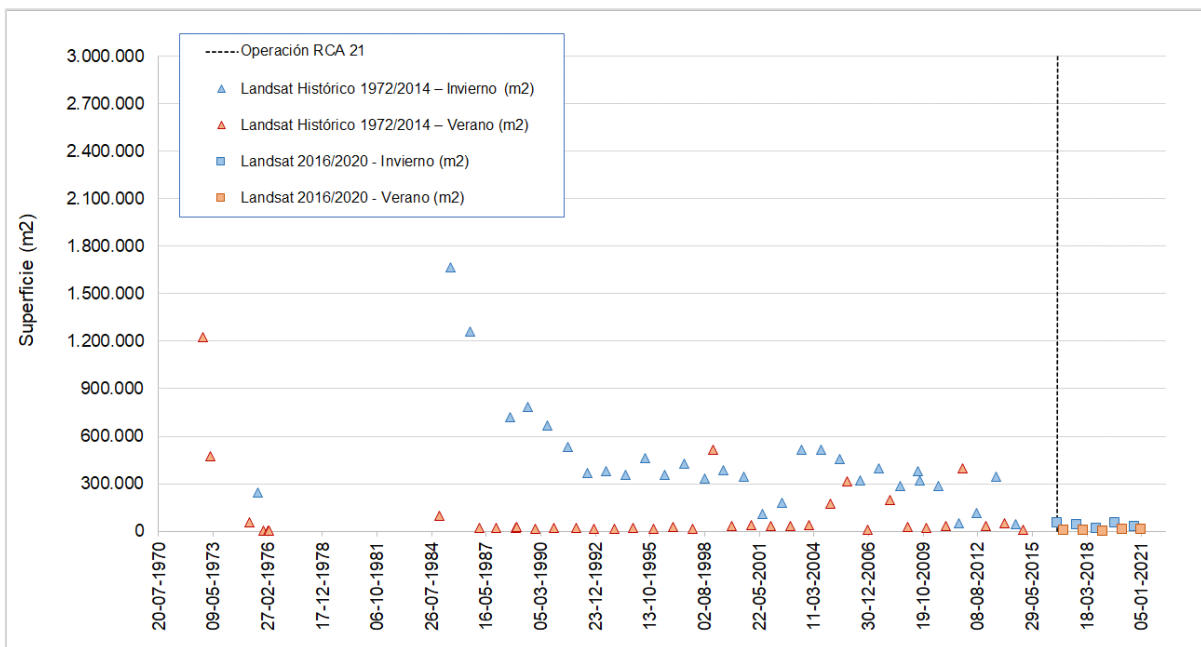
- Evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 y serie complementaria)

En la Figura N° 6-9 se presenta la serie histórica (1972 – 2020) de las superficies lagunares del sector Aguas de Quelana, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat asociadas al índice NDWI.

En la serie temporal histórica de NDWI, se puede observar que la máxima extensión de las lagunas se produce principalmente durante los meses de invierno, indicados en colores celestes en la gráfica. La superficie promedio en invierno es de 384.263 m², con máximo de 1.665.409 m² y mínimo de 24.300 m² (agosto 2018). Para la condición de verano la superficie promedio alcanza los 98.598 m², con una superficie máxima de 1.224.432 m² (octubre de 1972) y mínima de 2.469 m² (noviembre de 1975, febrero y marzo 1976). En este caso, se observa la mayor diferencia entre las superficies de los periodos de invierno y verano, siendo en el periodo de verano donde se producen las mayores bajas del sistema, donde se observa que los cuerpos de agua pueden llegar a reducirse hasta en un 98%.

La tendencia histórica de las superficies asociadas a los inviernos (julio – agosto) muestran un descenso entre 1985 a 1993 y que luego se estabiliza hasta julio 2013, con 2 temporadas de bajas en el 2001-2002 y 2011-2012. Para el período entre 2014 a 2020, las superficies reportadas tanto en invierno como de verano son similares entre sí, encontrándose las superficies de verano dentro de la serie histórica. La serie histórica de verano, se observa desde 1984 y durante todo resto del registro muy baja.

Figura N° 6-9. 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

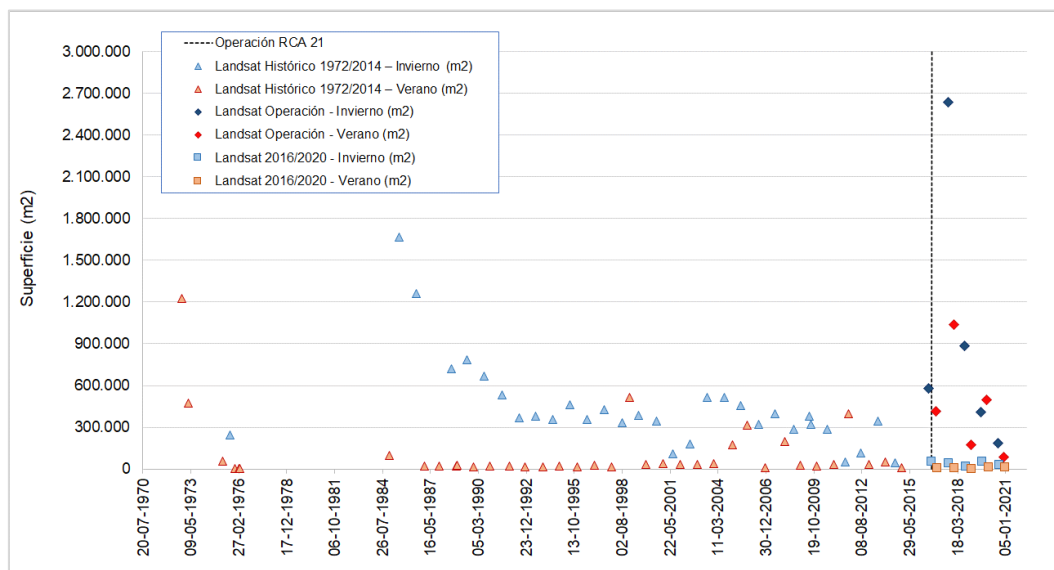
- Evolución de superficie de seguimiento mediante imágenes Landsat (serie PSAH) en relación a las superficies históricas (serie Adenda 5 y serie complementaria)

Los registros de superficies calculadas con Landsat, reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2020 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.

Las principales diferencias entre la serie histórica NDWI - Landsat y los resultados de los reportes semestrales en el marco del PSAH, se debe al 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 y análisis visual, 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. Para el caso de Aguas de Quelana, la metodología aplicada en el marco del PSAH, permite la inclusión de áreas de vegetación inundada a la superficie total de ocupación de las lagunas, señalados en los índices NDVI y por la Banda NIR, lo que explica la inclusión de áreas de transición que no son detectadas por la metodología NDWI-Landsat, lo que se traduce en las diferencias en las superficies de ambos métodos.

En el caso particular de los resultados semestrales de agosto 2017 y diciembre 2017 con imágenes Pleiades, la existencia de extensas zonas inundadas y su interconexión, produjo un aumento significativo de las áreas reportadas para ese periodo (Figura N° 6-10); la definición de esta área de ocupación incluyo zonas de transición entre recubrimientos (señalados por los diferentes índices espectrales) lo que otorga la diferencia a los resultados de la serie NDWI-Landsat histórica.

Figura N° 6-10. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Aguas de Quelana.



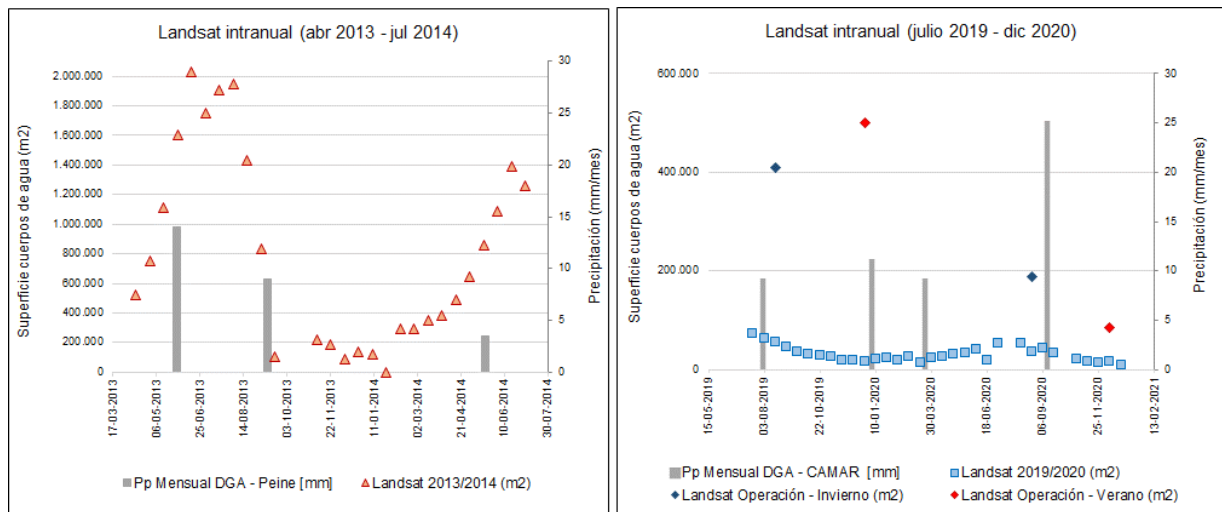
Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- 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° 6-9 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 este informe, período 2019 – 2020, junto a las precipitaciones. 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 2019 – 2020, muestran áreas mucho menores que las 2013-2014, pero también siguen mostrando un aumento de las superficies en invierno, entre julio y agosto de 2019 y descensos en época de primavera-verano, que bordean entre los 22.000 y 10.000 m², siendo el registro más bajo del periodo 2019 – 2020 el registrado en diciembre 2020 con 8.100 m².

Del análisis intranual y en relación con las precipitaciones, tanto el período 2013-2014 como el 2019-2020, 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 qué el agua en las lagunas está sometida a procesos de evaporación, y este sería el factor preponderante.

Figura N° 6-9. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Aguas de Quelana.



Fuente: Elaboración Propia

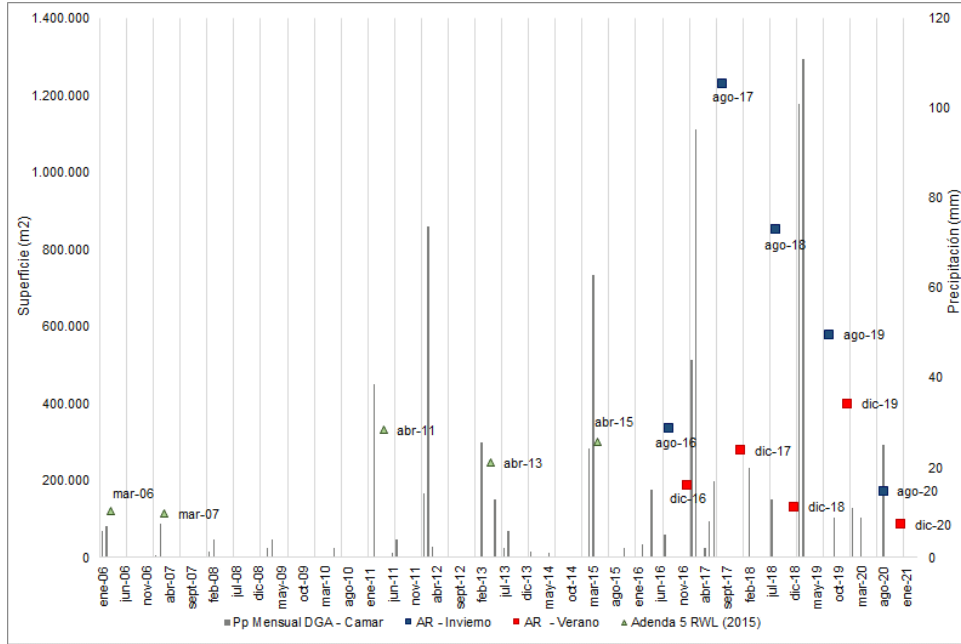
- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

Con respecto a la variación de las superficies semestrales del PSAH desde imágenes de alta resolución, para el sector Aguas de Quelana (Figura N° 6-11) se puede observar una cierta variabilidad estacional, con meses de agosto con superficies promedio de 527.468 m², con una superficie máxima de invierno en agosto de 2017 de 1.229.000 m²; mientras que en los meses de diciembre, la superficie promedio es de 215.828 m², con una superficie mínima de 85.441 m² en diciembre de 2020. En general, se observa una fluctuación de bajas y altas entre inviernos y veranos de diferente magnitud, tal como se aprecia en el comportamiento histórico. En relación con las superficies semestrales del PSAH y considerando el mínimo histórico AR (113.000 m²), se observó una cobertura en agosto de 2020 mayor en +59.000 m² (+52,2%) y la de diciembre 2020 es menor en -28.000 m² (-24,4%). 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 más significativas de las superficies semestrales 2016 – 2019, el registro de agosto de 2017 esta precedido por 166,2 mm acumulados desde enero a junio de 2017, siendo estas precipitaciones las de mayor volumen desde enero – febrero de 2012; luego otro aporte importante de precipitaciones al sector se da en enero – febrero de 2019 con 212,0 mm acumulados, que da como resultado una superficie sobre el promedio de las semestrales en agosto 2019 y el registro más alto para los veranos en diciembre de 2019 (se agrega además una precipitación en septiembre de 2019 con 9.0 mm acumulados). Las superficies mínimas de agosto y diciembre de 2020 fueron precedidas por precipitaciones en donde desde marzo de 2019 a octubre 2020, se reportaron 54 mm acumulados. Si bien se observa una sincronía entre el aumento de las superficies y mayor aporte de precipitación, éstas sólo se observan en fechas puntuales donde el aporte de precipitaciones excede el promedio para el sector (4,5 mm aprox.) y bordea las máximas (100 mm aprox.). Del análisis presentado intranual e interanual se considera que se verifica el modelo conceptual, en cuanto a que si bien el aporte de precipitaciones es importante, el factor principal que entrega la variabilidad estacional, estaría dado por la evaporación del sistema.

¹⁸ La recopilación de información de precipitaciones anuales de la estación meteorológica DGA – Camar, actualizada en línea hasta octubre de 2020.

Figura N° 6-11. 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 Puillar. 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 Puillar 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.

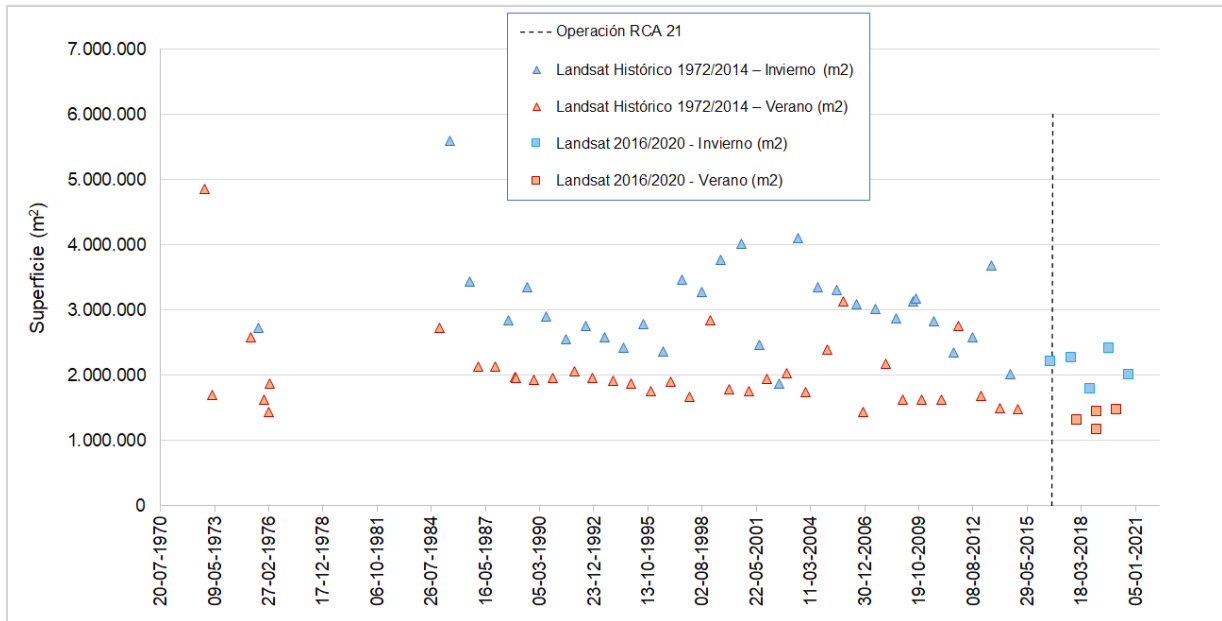
- Evolución histórica de superficie mediante imágenes Landsat (serie Adenda 5 y serie complementaria)

En la Figura N° 6-12, se presenta la serie histórica (1972 – 2020) 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, siendo los años con menor superficie 2002 y 2018. La superficie promedio en invierno es de 2.929.620 m², con máximo de 5.594.631 m² (julio de 1985) y mínimo de 1.793.700 m² (agosto 2018), y para el verano la superficie promedio alcanza los 1.961.793 m², con una superficie máxima de 4.856.771 m² y mínima de 1.177.200 m² (agosto de 2018). 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 hasta 2014 (descenso 1986-1996; ascenso 1997-2003; descenso

2004-2014), para luego estabilizarse entre 2015 y 2020. Respecto a las superficies históricas medidas en verano, éstas se observan en general con tendencia al descenso, desde 1984 a la fecha.

Figura N° 6-12. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor.



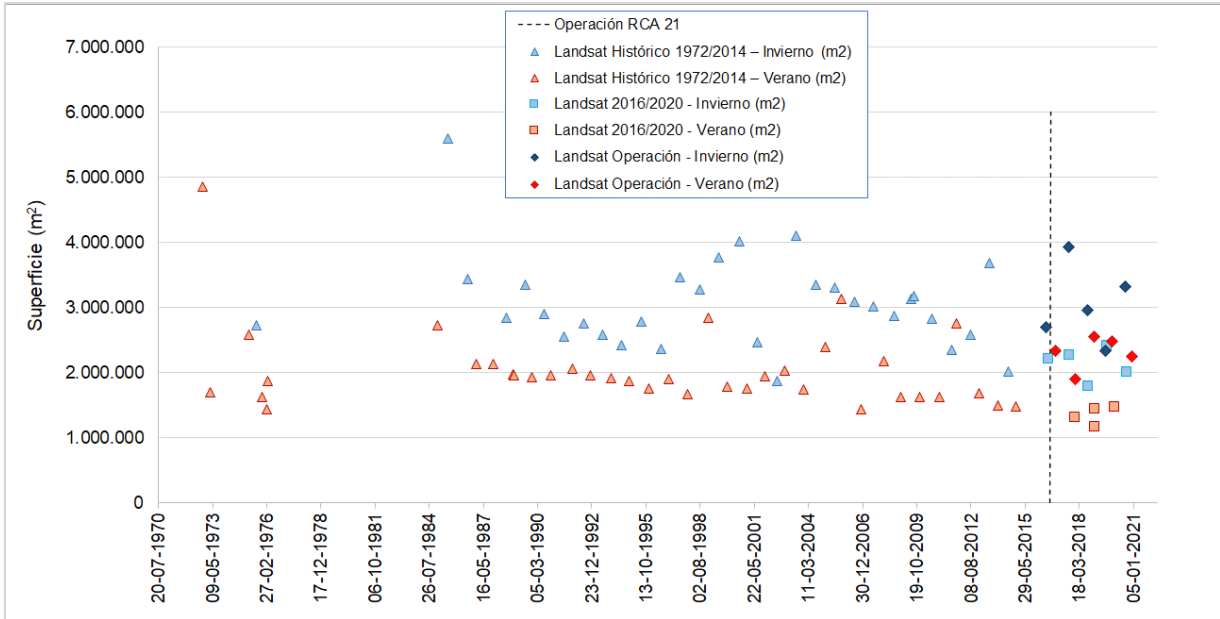
Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

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

Los registros de superficies semestrales calculadas con Landsat, reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2020 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 – 2020 (Figura N° 6-13). 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.

Figura N° 6-13. Variación interanual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat reportadas en el PSAH e históricas, Sector Soncor.



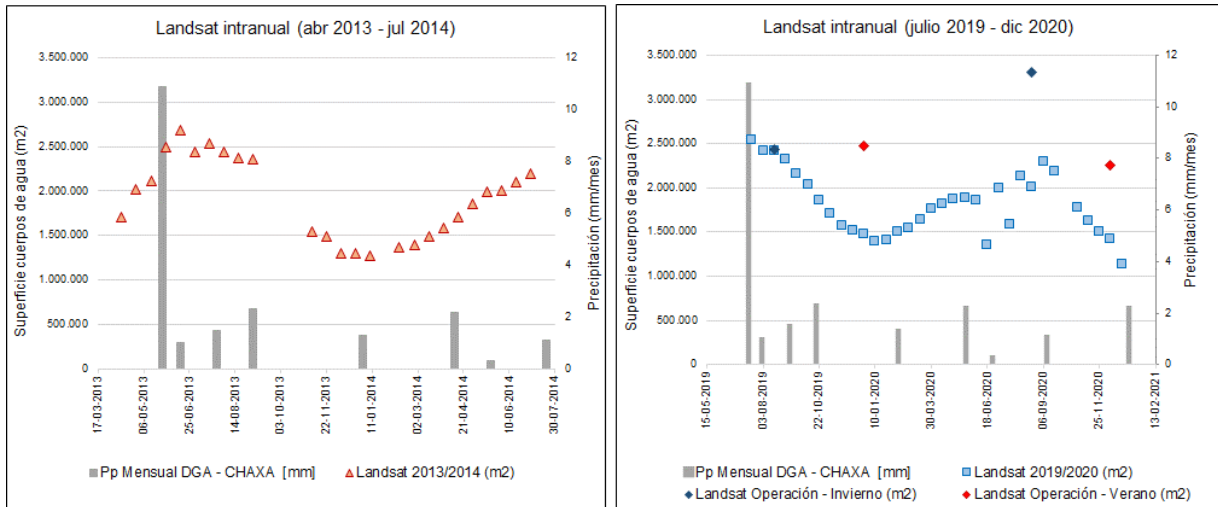
Fuente: Elaboración Propia en base a los datos del Anexo 1: Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama, de la Adenda 5

- Variación intranual de la superficie lagunar mediante imágenes Landsat

Con respecto a las variaciones intranuales para el sector Soncor, en la Figura N° 6-14 se observa la variación de las superficies lagunares mediante el índice NDWI - Landsat, durante los años 2013 – 2014 y 2019 – 2020 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 2019 – 2020, también muestran un aumento de las superficies en invierno; mientras que los registros mínimos, se aprecian entre noviembre y febrero de ambos años, siendo el registro más bajo del periodo 2019 – 2020 el registrado en diciembre 2020 con 1.133.100 m², registros en el rango bajo que también se repiten en diciembre de 2013 y febrero de 2014. Por lo anterior, se tiene que la precipitación no sería el factor preponderante al cual atribuir la variabilidad estacional del sistema.

Figura N° 6-14. Variación intranual de las superficies lagunares mediante el uso de imágenes Landsat, Sector Soncor.



Fuente: Elaboración Propia

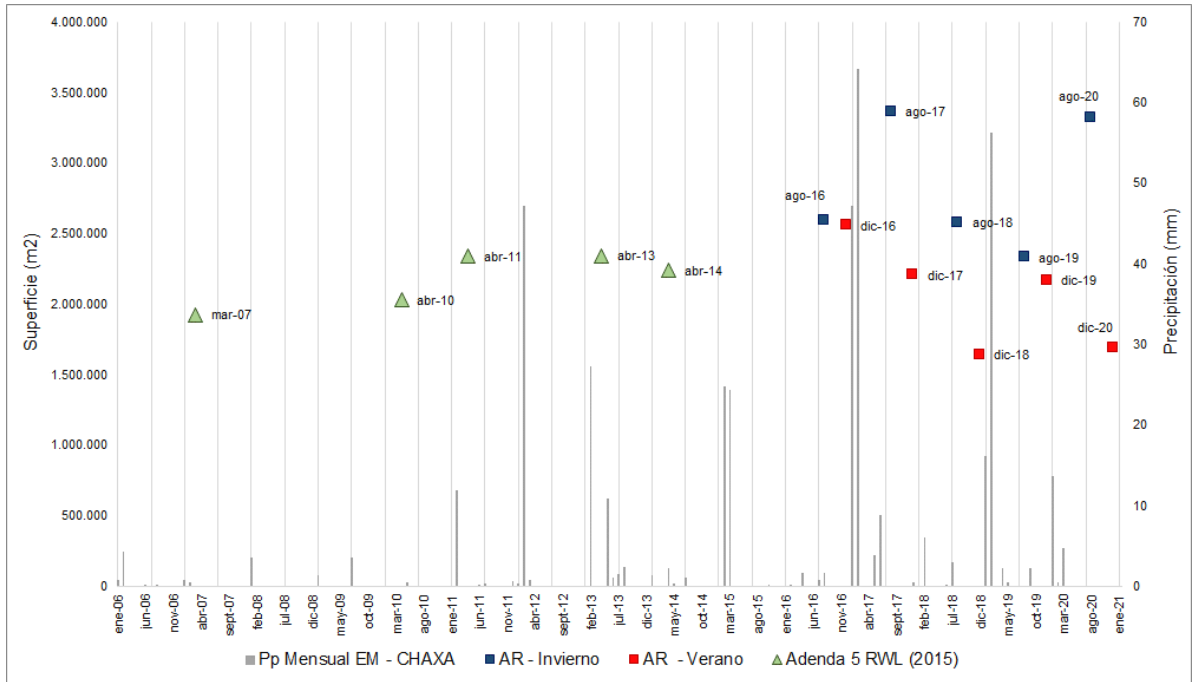
- Variación de la superficie lagunar mediante imágenes de alta resolución

Con respecto a la variación de las superficies semestrales del PSAH desde imágenes de alta resolución, para el sector Soncor (Figura N° 6-15) 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). En el último año, la cobertura en agosto de 2020 es mayor en +1.392.000 m² (+72,3%) y la de diciembre 2020 es menor en -235.000 m² (-12,2%) respecto al mínimo reportado en la Adenda 5. 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 sector¹⁹, para las superficies máximas del periodo 2016 – 2020, 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.

¹⁹ La recopilación de información de precipitaciones anuales de la estación meteorológica EM – Chaxa.

Figura N° 6-15. Precipitaciones mensuales y superficie lagunar desde imágenes de alta resolución, sistema Lagunar Soncor.



Fuente: Elaboración Propia

7 CONCLUSIONES

Con respecto a los resultados de las superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar, al contrastar los resultados anuales de los cuatro sistemas en 2020, se observa que la mayor cobertura es con imágenes Pleiades 1A, tanto en invierno 2020 como en verano 2020, son para el sector Soncor con 2.552.516 m² y 1.689.478 m², respectivamente. En tanto, las menores superficies se presentaron en el sector Aguas de Quelana, en invierno 2020 con 171.739 m² y 85.441 m² en verano 2020 (Tabla N°7-1).

El análisis comparativo de las superficies de cuerpos de agua determinadas para el quinto año de monitoreo 2020 con respecto a los registros históricos se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Tabla N°7-1. Dentro de esta comparativa, es importante destacar que las superficies históricas en AR han sido determinadas en meses distintos (mar – abr) 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 (Pleiades 1A y Landsat 8) y datos obtenidos en el monitoreo 2020 (invierno y verano), respecto de los registros de línea de base e históricos (Adenda 5 RWL, 2015).

Tipo de imagen	Sistema Lagunar	Superficies de registros históricos (Adenda 5 RWL, 2015)			Superficies sistemas lagunares – Monitoreos Año 2020		
		Promedio (m ²)	Máximo (m ²)	Mínimo (m ²)	Invierno 2020	Verano 2020	Promedio anual (2020)
					m ²	m ²	m ²
Superficies Pleiades 1A de alta resolución	PB	338.000	350.000	316.000	514.417,6	284.172,6	399.295,1
	PE	648.000	736.000	489.000	542.094,0	734.637,7	638.365,9
	AQ	222.000	331.000	113.000	171.738,5	85.441,2	128.589,9
	SO	2.174.000	2.342.000	1.924.000	2.552.515,9	1.689.477,5	2.120.996,7
Superficies Landsat 8 de media resolución	PB	-	-	-	600.191,3	360.957,7	480.574,5
	PE	-	-	-	1.054.402,8	830.121,6	942.262,2
	AQ	-	-	-	187.456,8	84.779,6	136.118,2
	SO	-	-	-	3.315.701,1	2.255.468,3	2.785.584,7

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

*Los valores históricos se obtuvieron sólo a partir de imágenes de alta resolución.

Fuente: Cedrem Consultores

La validación del ajuste de las coberturas determinadas, en relación a los datos de terreno recabados y fotointerpretados, mediante el índice *Kappa*, tuvo una variación entre 0,64 y 0,98 para imágenes de alta resolución Pleiades-1A y desde 0,56 y 0,80 para imágenes de resolución media Landsat 8 en agosto de 2020. Respecto de diciembre de 2020, este índice tuvo una variación entre 0,37 y 0,94 para imágenes de alta resolución Pleiades-1A y desde 0,44 a 0,75 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 *aceptable a casi perfecta*²⁰.

La correlación entre las superficies calculadas desde de alta resolución (Pleiades 1A) y desde media resolución (Landsat), y según el coeficiente de correlación de Pearson, muestran que para los sectores La Punta-La Brava, Peine y Soncor, las variables tienen una *relación positiva*, con una correlación entre *moderada y baja*; mientras que los valores *p* indican que existe *evidencia no concluyente* sobre la significancia estadística de la asociación entre las variables Pleiades y Landsat; por otra parte, para el sector Aguas de Quelana, las variables muestran una *relación positiva y alta correlación*, con un valor *p* que indica que existe una *significancia estadística* en la asociación. Esto señala, que en la mayoría de los sectores, que existe un relación moderada entre los resultados provenientes de AR y Landsat, diferencias que 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 de los recubrimientos (por la mejora del contraste y respuesta espectral que otorga las imágenes de alta resolución), lo que produce diferencias en la magnitud de los valores, pero relacionándose en sentido directo (a valores altos de una le corresponden valores altos de la otra e igualmente con los valores bajos).

- Sector La Punta-La Brava

Según el análisis de comparación con registros históricos de línea de base, y según la evolución de la superficie mediante imágenes NDWI-Landsat, para el sector de La Punta y La Brava se observa que la máxima extensión de las lagunas se produce durante los meses de invierno y los registros más bajos en general se observan en verano. Se observa una tendencia histórica al descenso de las superficies asociadas a los inviernos (julio – agosto), desde el año 1984, las superficies registradas en los veranos (enero – febrero, diciembre) presentan estabilidad en sus valores a excepción de un evento de alza en enero del año 1999. 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.

Las superficies calculadas con imágenes de media resolución Landsat durante el monitoreo 2016 a 2020, como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI, tanto en las superficies de invierno y verano, considerando las superficies históricas 1972 – 2014 y 2016 - 2020.

De las variaciones intranuales y su relación con las precipitaciones, para ambas series intranuales 2013/2014 y 2019/2020, se observa que para La Punta-La Brava, 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 del sector, tendría una relación más directa con la evapotranspiración, dejando la

²⁰ 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).

precipitación como un factor secundario, dado que esta produce variaciones significativas de la superficie, sólo para eventos de “alta precipitación”.

La variación de las superficies semestrales de alta resolución del PSAH para el sector La Punta – La Brava en relación con las superficies históricas AR (Adenda 5 RWL, 2015), muestran que las superficies semestrales, se presentan sobre los históricos, a excepción del mes de diciembre de 2020. 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. En general, las variaciones estacionales con inviernos de mayor área de ocupación lagunar y veranos con menor superficie lagunar, puede observarse tanto en las series de las imágenes de alta resolución como las de media resolución, pero en la serie de alta resolución no se observa una diferencia constante entre inviernos y veranos, siendo más amplia o más acotada, sin un patrón fijo.

- Sector Peine

Para el sector Peine, la serie histórica muestra que la máxima extensión de las lagunas se produce principalmente durante los meses de invierno, siendo en el último tiempo (2016-2020) donde se observa una menor diferencia entre las superficies de los periodos de invierno y verano, manteniéndose estable y por sobre los valores históricos. Los registros de superficies calculadas con Landsat, reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2020 como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI-Landsat, tanto en invierno como en verano, y para las series 1972 – 2014 y 2016 - 2020.

Para la variabilidad intranual, en este sector se observa mayor variabilidad de las superficies en el periodo 2013 – 2014, con un periodo 2019 – 2020 que muestra una fuerte alza en septiembre de 2020, ligado eventualmente a un mayor aporte de precipitaciones en agosto 2020, pero de la cual la estación DGA - Peine no cuenta con registro. Este acontecimiento podría denotar una relación entre las precipitaciones y la variación de la superficie lagunar en este sector; sin embargo, no es concluyente al considerar otros datos, inter e intranuales, entregados por la estación meteorológica Planta Albemarle y las variaciones de las superficies registradas en el sector asociadas temporalmente.

La variación de las superficies semestrales de alta resolución del PSAH para el sector Peine, se encuentran sobre los mínimos históricos de AR, con una variación estacional no influenciada por la evaporación, donde no se evidencia una correlación directa entre la precipitación registrada en la estación meteorológica DGA - Peine y Planta Albemarle, y las variaciones en el área de ocupación de los cuerpos de agua. 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.

- Sector Aguas de Quelana

Para el sector Aguas de Quelana, la serie temporal histórica de NDWI-Landsat muestra que la máxima extensión de las lagunas se produce principalmente durante los meses de invierno, siendo en el periodo de verano donde se producen las mayores bajas del sistema, donde se observa que los cuerpos de agua pueden llegar a reducirse hasta en un 98%. La serie histórica de verano se observa desde 1984 y durante todo resto del registro muy baja.

Los registros de superficies calculadas con Landsat, reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2020 como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI-Landsat, tanto en invierno como en verano para las series 1972 – 2014 y complementaria 2016 – 2020,

Con respecto a las variaciones intranuales para el sector Aguas de Quelana, los registros en la serie 2019 – 2020, muestra áreas menores que las de 2013-2014, pero también siguen mostrando un aumento de las superficies en invierno, entre julio y agosto de 2019 y descensos en época de primavera-verano. Del análisis intranual y en relación con las precipitaciones, tanto el período 2013-2014 como el 2019-2020, 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 qué el agua en las lagunas está sometida a procesos de evaporación, y este sería el factor preponderante

En el sector las superficies en alta resolución del PSAH se encuentran bajo el mínimo histórico en diciembre 2020 y sobre el mínimo en el resto de los registros. En la variación de las superficies semestrales del PSAH desde imágenes de alta resolución, se observa una fluctuación de bajas y altas entre inviernos y veranos de diferente magnitud, tal como se aprecia en el comportamiento histórico interanual e intranual del NDWI-Landsat; y sólo se observan en fechas puntuales donde el aporte de precipitaciones excede el promedio para el sector (4,5 mm aprox.) y bordea las máximas (100 mm aprox.). 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.

Del análisis presentado intranual e interanual se considera que, en cuanto a que, si bien el aporte de precipitaciones es importante, el factor principal que entrega la variabilidad estacional, estaría dado por la evaporación del sistema.

- Sector Soncor

Para el sector Soncor, la serie histórica NDWI-Landsat, muestra que la máxima extensión de la superficie de los cuerpos de agua se presenta en los meses de invierno, con registros más bajos en verano. Las variaciones entre las superficies de inviernos y veranos son variables, donde el sector Soncor puede presentar diferencias entre las superficies de los periodos de invierno y verano que puede alcanzar hasta el 60%. En general, de la serie histórica, se observa una tendencia al descenso, desde 1984 a la fecha.

Los registros de superficies semestrales en el sector Soncor y calculadas con imágenes satelitales Landsat, reportadas durante el monitoreo de 2016 a 2020 como parte del PSAH, se encuentran dentro de los registros máximos y mínimos según el análisis de variación del índice NDWI-Landsat, tanto en invierno como en verano, considerando las superficies históricas 1972 – 2014 y 2016 - 2020.

Del análisis intranual de superficies lagunares realizados en las series 2013/2014 y 2019/2020, se puede observar que la máxima extensión de las lagunas se produce durante los meses de invierno; sin embargo, las diferentes variaciones no tendrían como factor preponderante a las precipitaciones.

En relación con las superficies históricas en AR (Adenda 5 RWL, 2015), las superficies semestrales del PSAH se presentan sobre el mínimo de Adenda 5 AR (1.924.000 m²) en los registros 2016 – 2020, a excepción de diciembre 2020 donde se presenta bajo el mínimo; con variabilidad estacional entre registros. 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.

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. Region de Antofagasta.

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.

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.

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”.

RWL, Rockwood Lithium. 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.

RWL, Rockwood Lithium. 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.

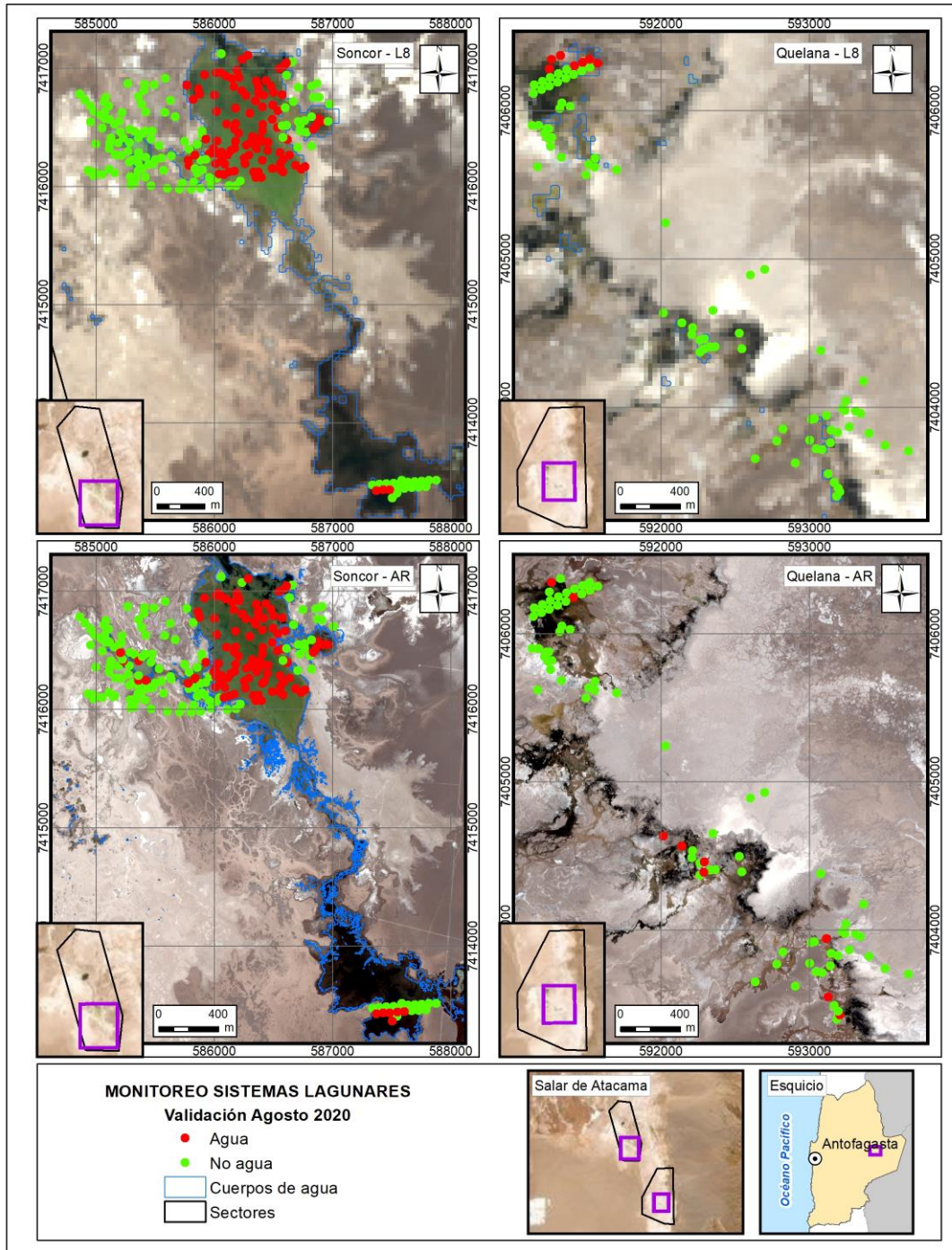
RWL, Rockwood Lithium. 2017a. Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama. Plan de Seguimiento Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016), Monitoreo Año II, agosto de 2017.

RWL, Rockwood Lithium. 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.

-
- RWL, Rockwood Lithium. 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.
- RWL, Rockwood Lithium. 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.
- RWL, Rockwood Lithium. 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.
- RWL, Rockwood Lithium. 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.
- RWL, Rockwood Lithium. 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 IV, agosto de 2020.
- RWL, Rockwood Lithium. 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 IV, diciembre de 2020.
- 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.

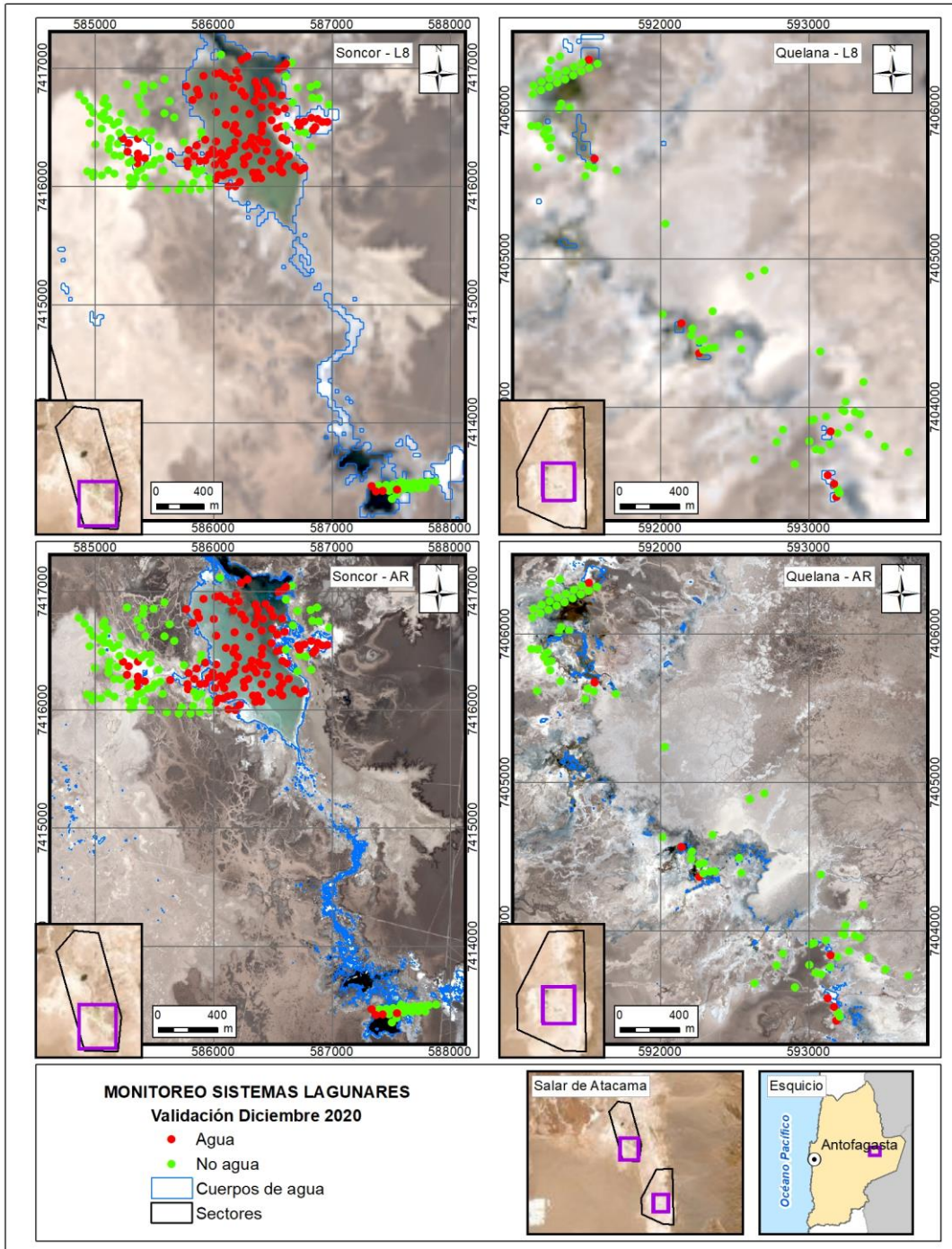
9 ANEXOS

ANEXO 9-1. Distribución de puntos de validación para imágenes LANDSAT 8 y PLEIADES
 1-A, SECTOR NORTE. Agosto 2020.



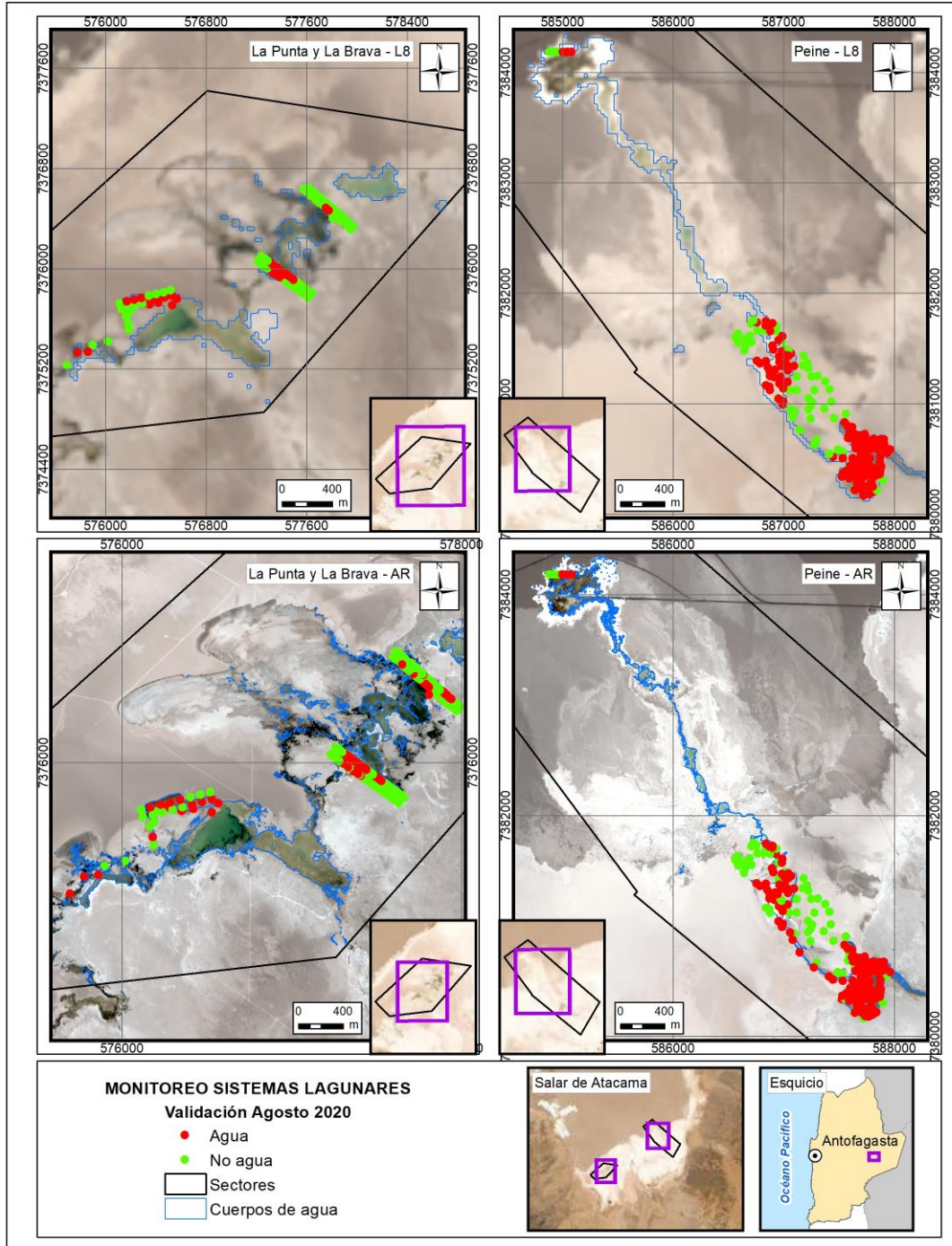
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 9-2. Distribución de puntos de validación para imágenes LANDSAT 8 y PLEIAIDES
 1-A, SECTOR NORTE. Diciembre 2020.**



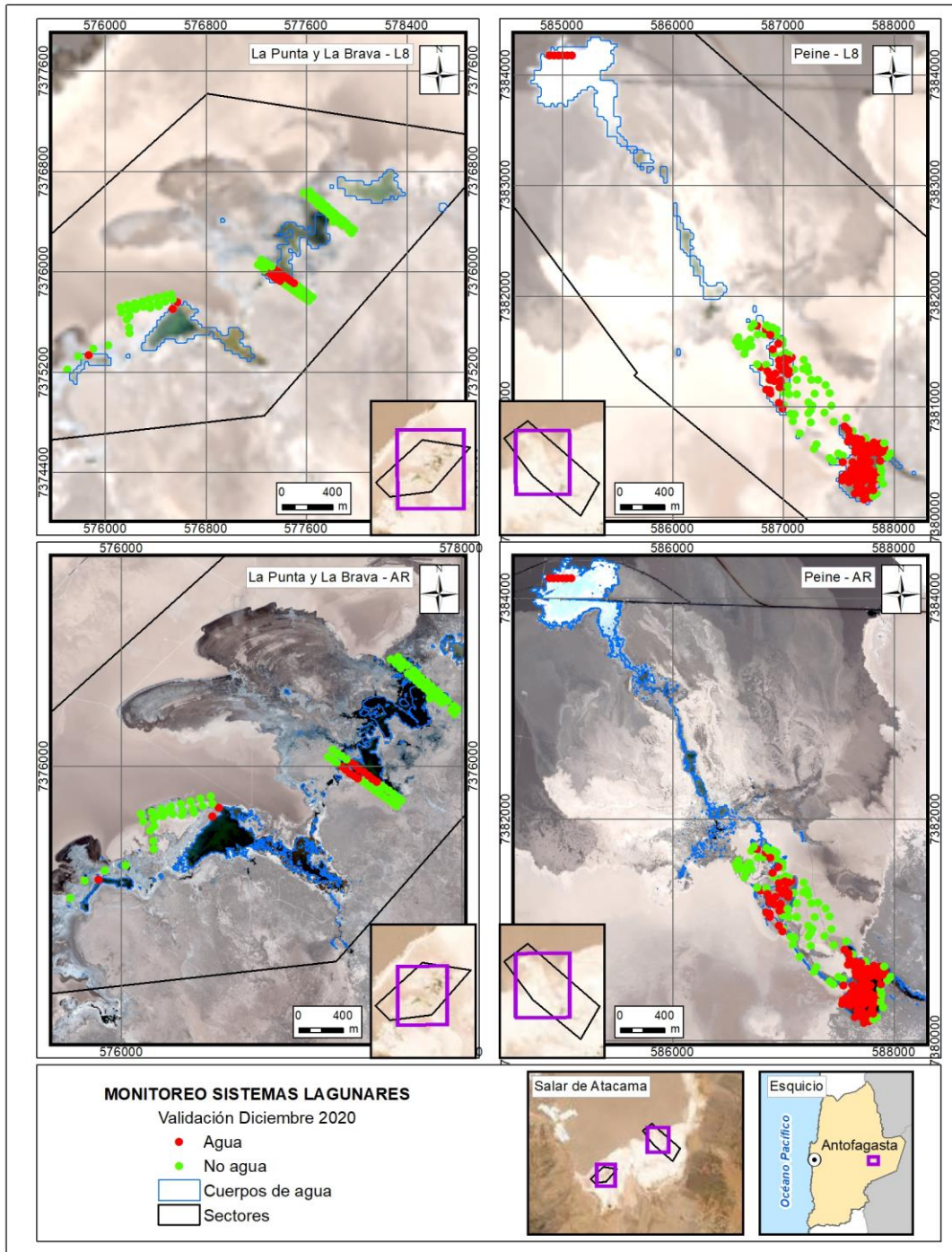
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-3. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes LANDSAT 8 y PLEAIDES 1-A, SECTOR SUR. Agosto 2020.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-4. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes LANDSAT 8 y PLEAIDES 1-A, SECTOR SUR. Diciembre 2020.



Fuente: Elaboración propia

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

Archivo adjunto en formato Excel:

ALB_AGUA_PM_VALID_AR_L8_AGO20_DIC20_05022021.xlsx

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

MATERIALES Y MÉTODOS CON MODIFICACIÓN	LÍNEA DE BASE (Adenda 5 RWL, 2015)	MONITOREO FASE DE OPERACIÓN (CEDREM Consultores)	DESCRIPCIÓN DE MODIFICACIÓN APLICADA
1. Imágenes satelitales de alta resolución	Worldview 2, Geoeyes 1 y Quickbird 2.	Pleiades 1A	Cambio efectuado con el fin poder cubrir grandes superficies rápidamente, con poco tiempo de confirmación previa, y con un solo sensor que permite mayor homogeneidad de los datos. Asimismo, mejor coherencia de los datos entre sí (por menor rango temporal en completar la cobertura de cada polígono); en un mayor ancho de franja que permite menor cantidades de escenas a unir y un mayor grado de coregistro de las imágenes (importante para la detección de cambios en estudios multitemporales). Cabe destacar que son mínimas las diferencias de resolución - espectral y espacial-, entre estas imágenes; por lo mismo conducen a poca variación en los análisis realizados.
2. Validación en terreno	No especificado	Índice <i>Kappa</i> en base a diseño de muestreo estadístico aleatorio – estratificado, por sistema lagunar.	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. La validación en terreno en categorías “agua”, “no agua” permite una evaluación binaria que da certidumbre al modelo.
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)	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. La corrección utilizada (con mejor efecto de remoción del error atmosférico), conllevó a que tanto los parámetros espectrales, como el modelo de

MATERIALES Y MÉTODOS CON MODIFICACIÓN	LÍNEA DE BASE (Adenda 5 RWL, 2015)	MONITOREO FASE DE OPERACIÓN (CEDREM Consultores)	DESCRIPCIÓN DE MODIFICACIÓN APLICADA
			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 1A), • NDVI, • Transformada <i>Tasseled Cap</i> "Wetness" (en Landsat 8) 	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. En el modelo de clasificación, la incorporación de más parámetros espectrales, condujo principalmente a una mayor sensibilidad en la detección de cuerpos de agua.
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 de línea de base.	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 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 . Por lo 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 2020.	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 1A

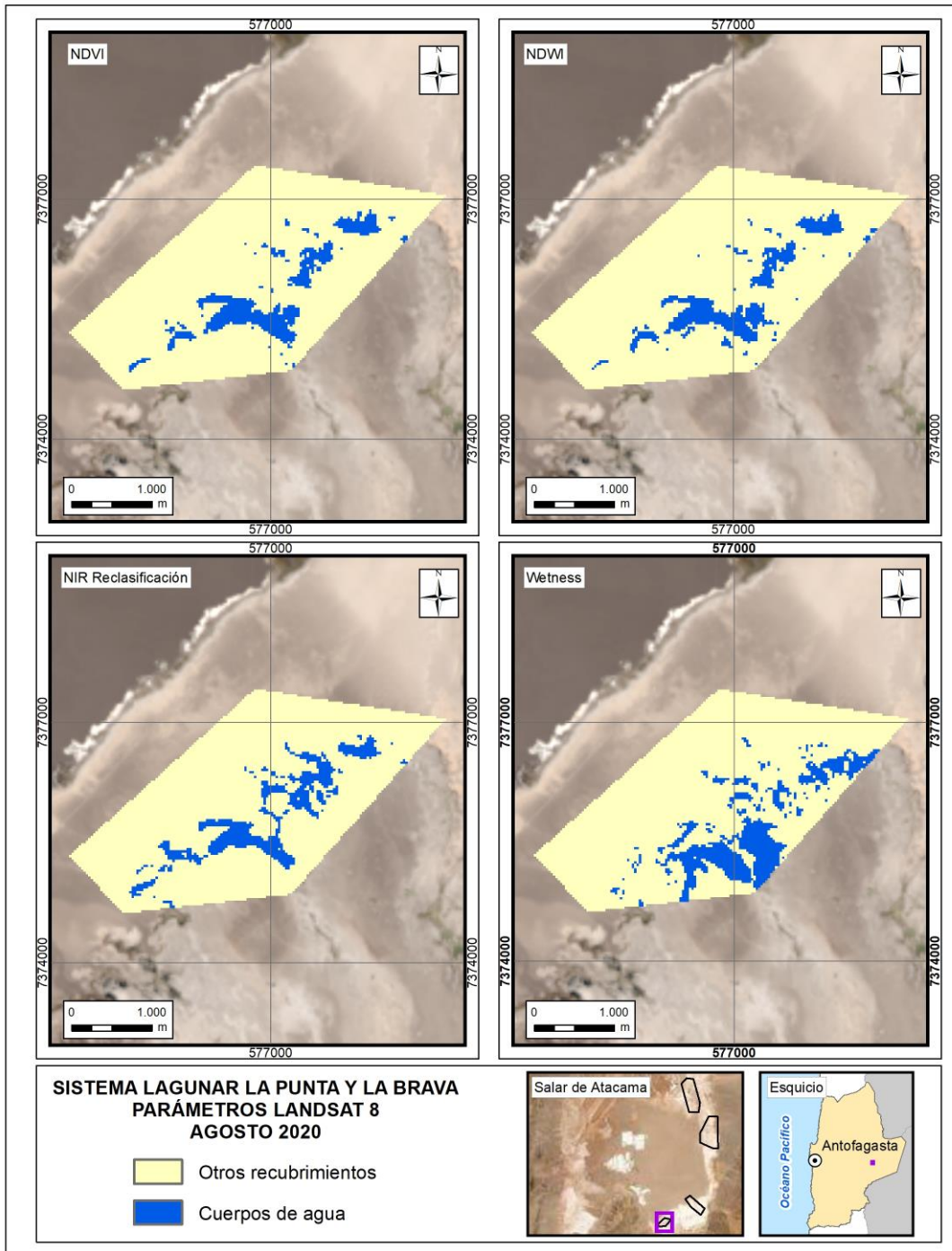
Archivos adjuntos de imágenes de alta resolución según sus características en la carpeta adjunta:

Metadata_IMA_Pleiades_AGO20 / Metadata_IMA_Pleiades_DIC20

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

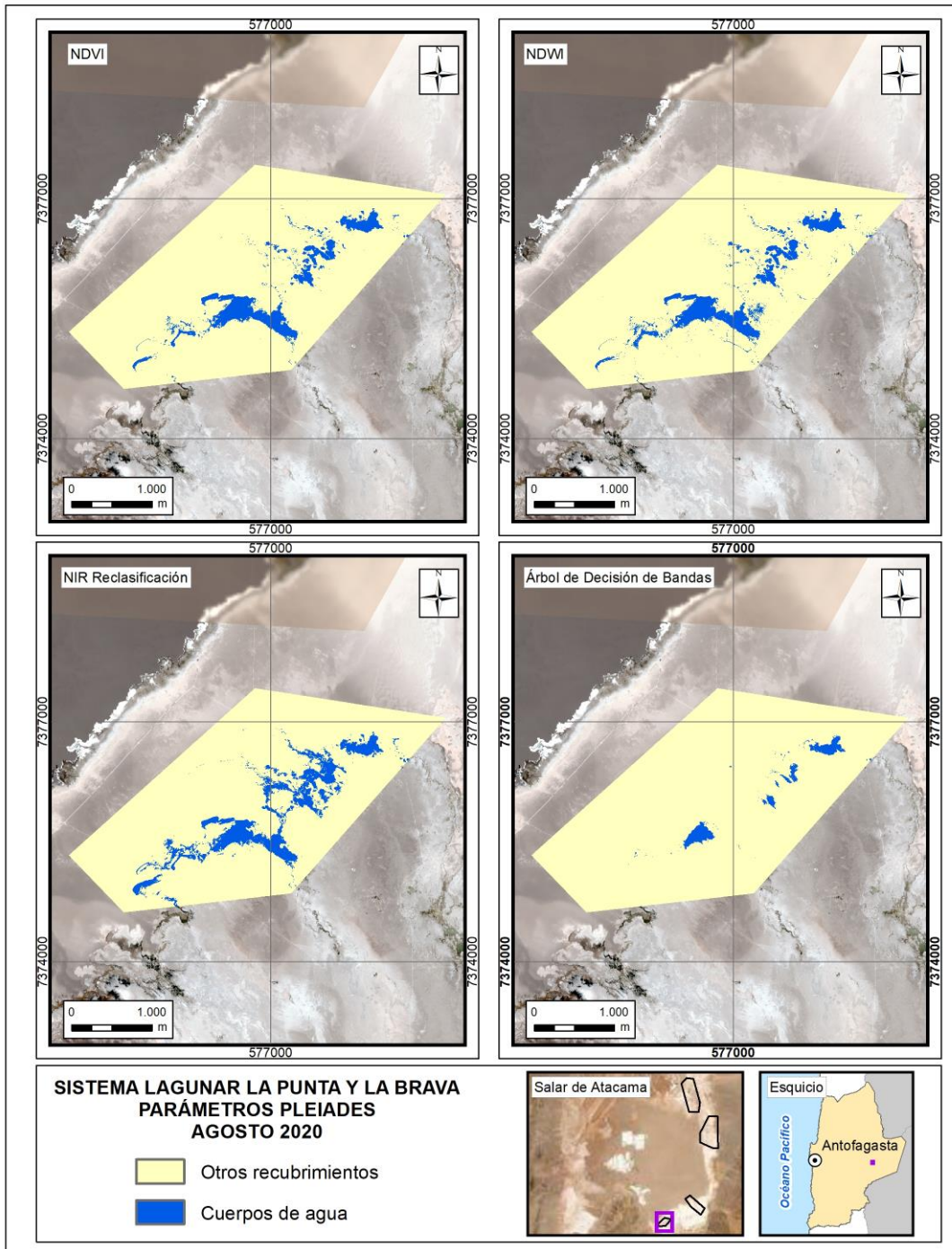
Archivo adjunto en formato pdf. / Metadata_AGO20_Landsat 8.pdf / Metadata_DIC20_Landsat 8.pdf

ANEXO 9-9. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes LANDSAT 8, invierno 2020.



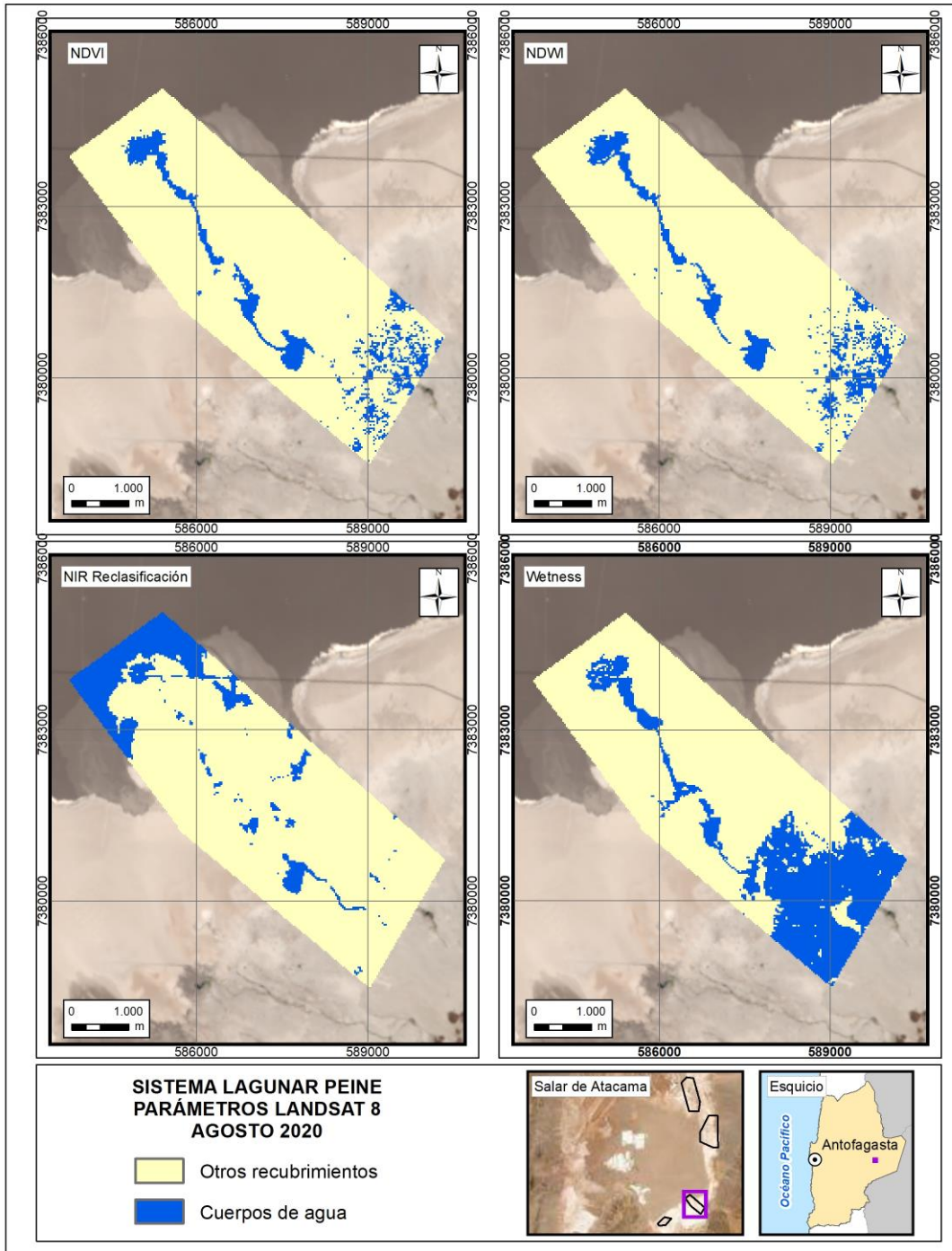
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-10. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes PLEIADES 1A, invierno 2020.



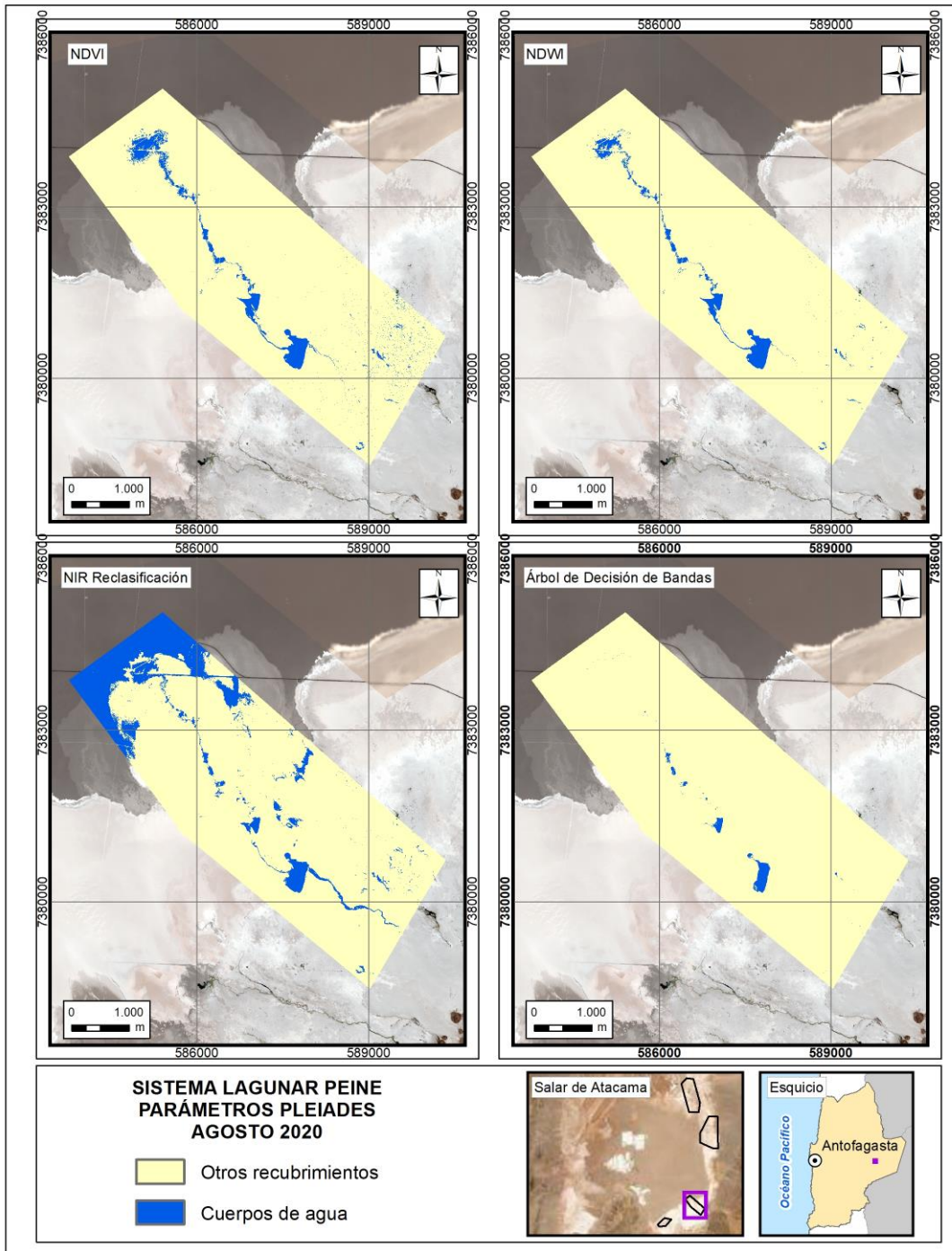
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-11. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes LANDSAT 8, invierno 2020.



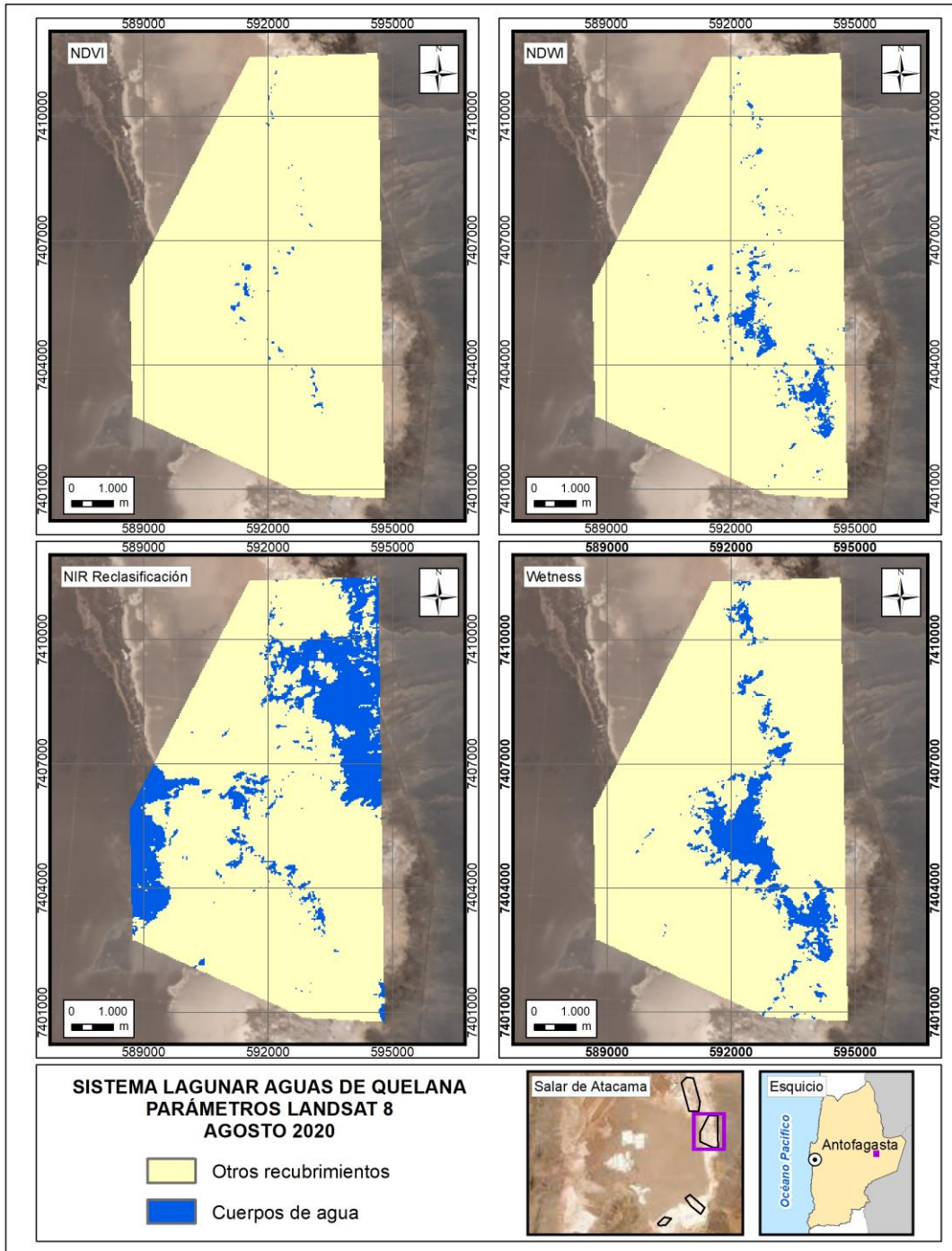
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-12. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes PLEIADES 1A, invierno 2020.



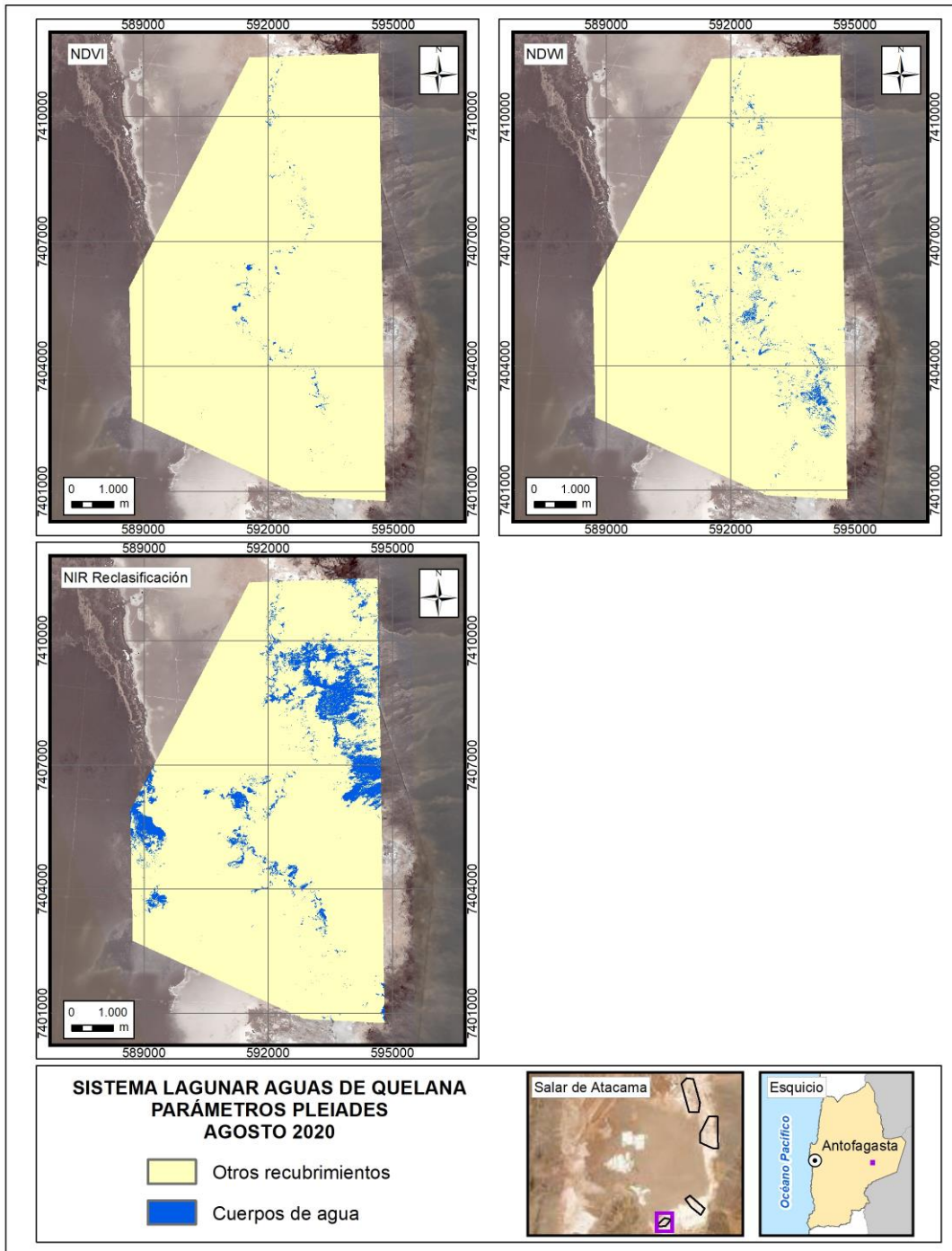
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-13. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes LANDSAT 8, invierno 2020.



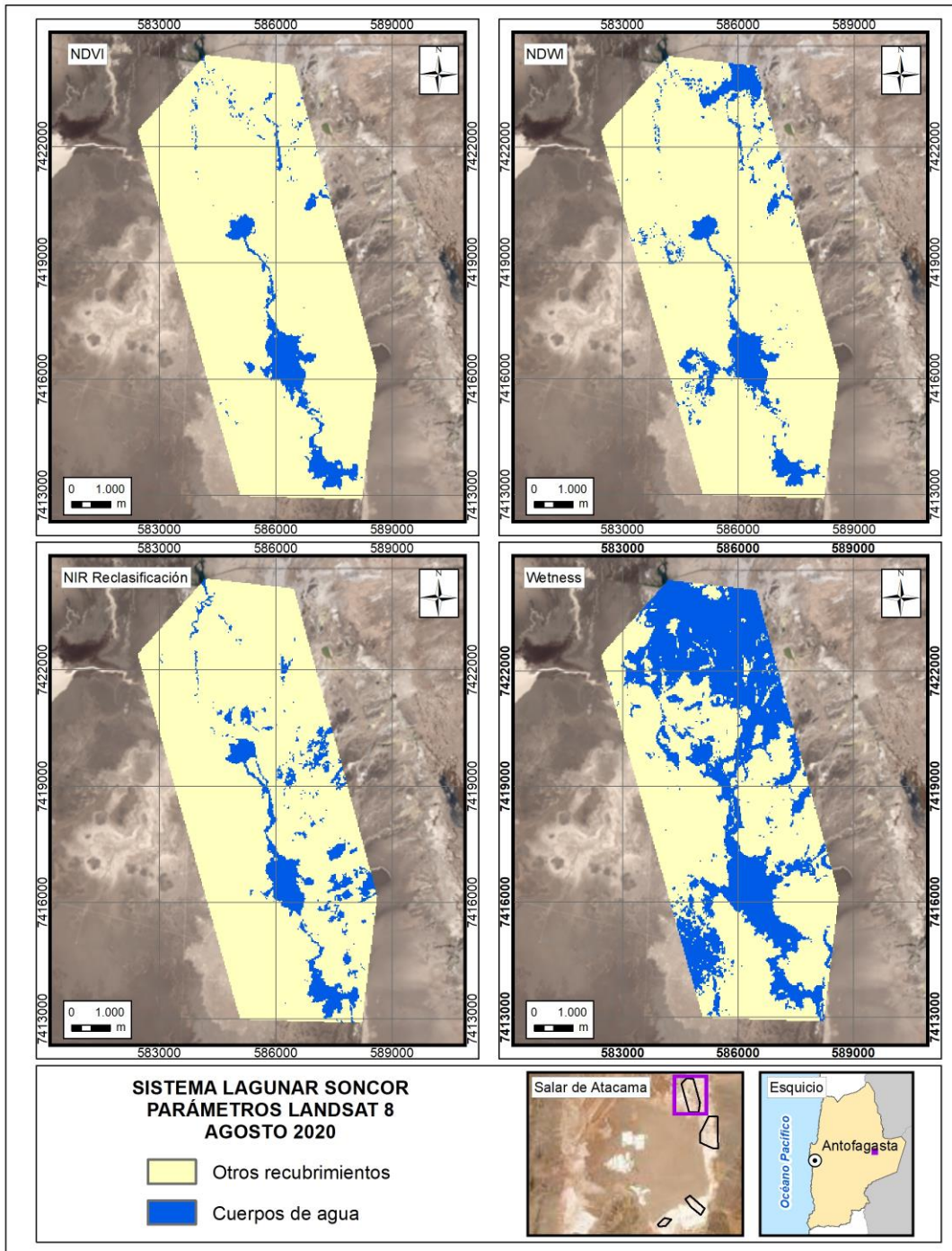
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-14. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes PLEIADES 1A, invierno 2020.



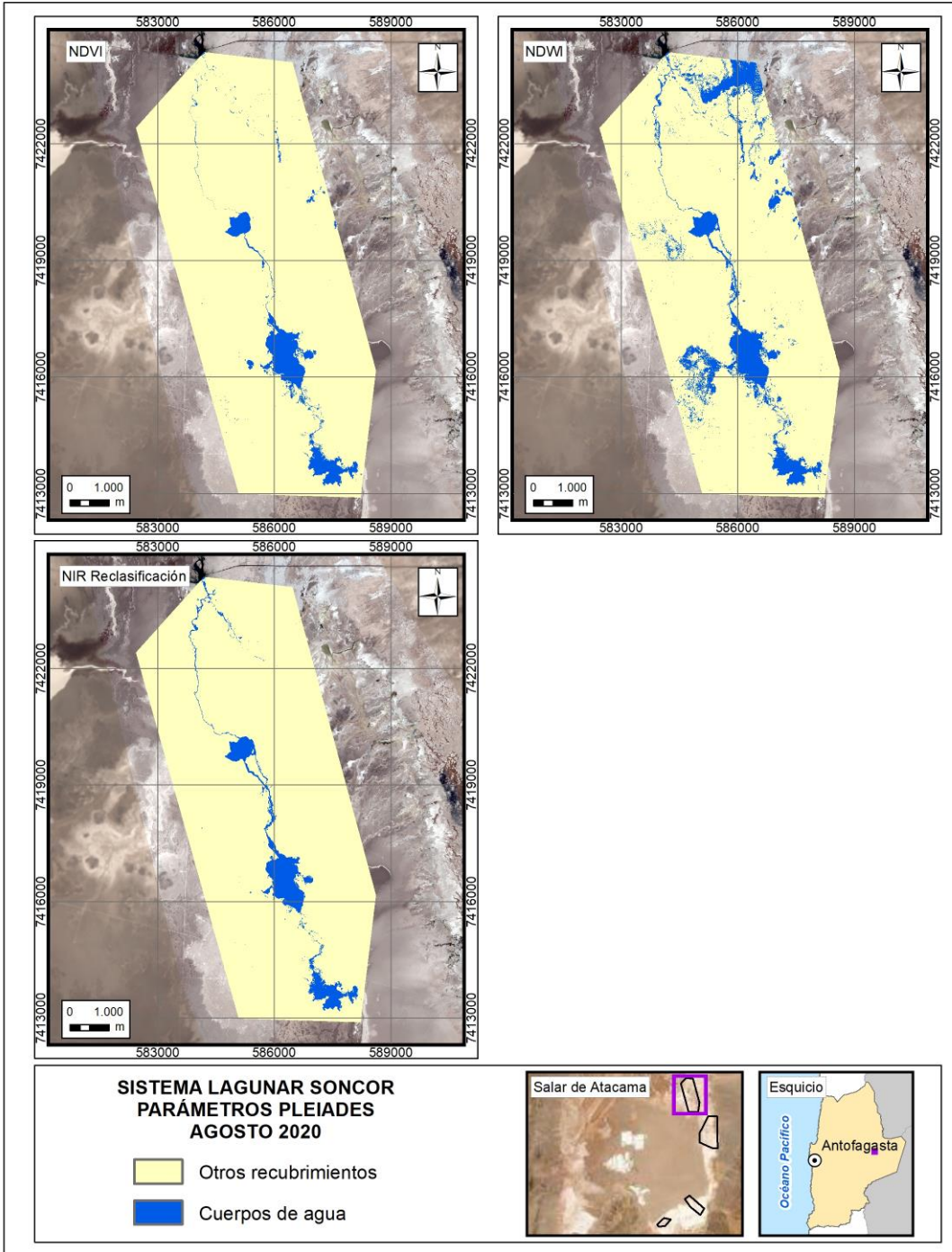
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-15. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes LANDSAT 8, invierno 2020.



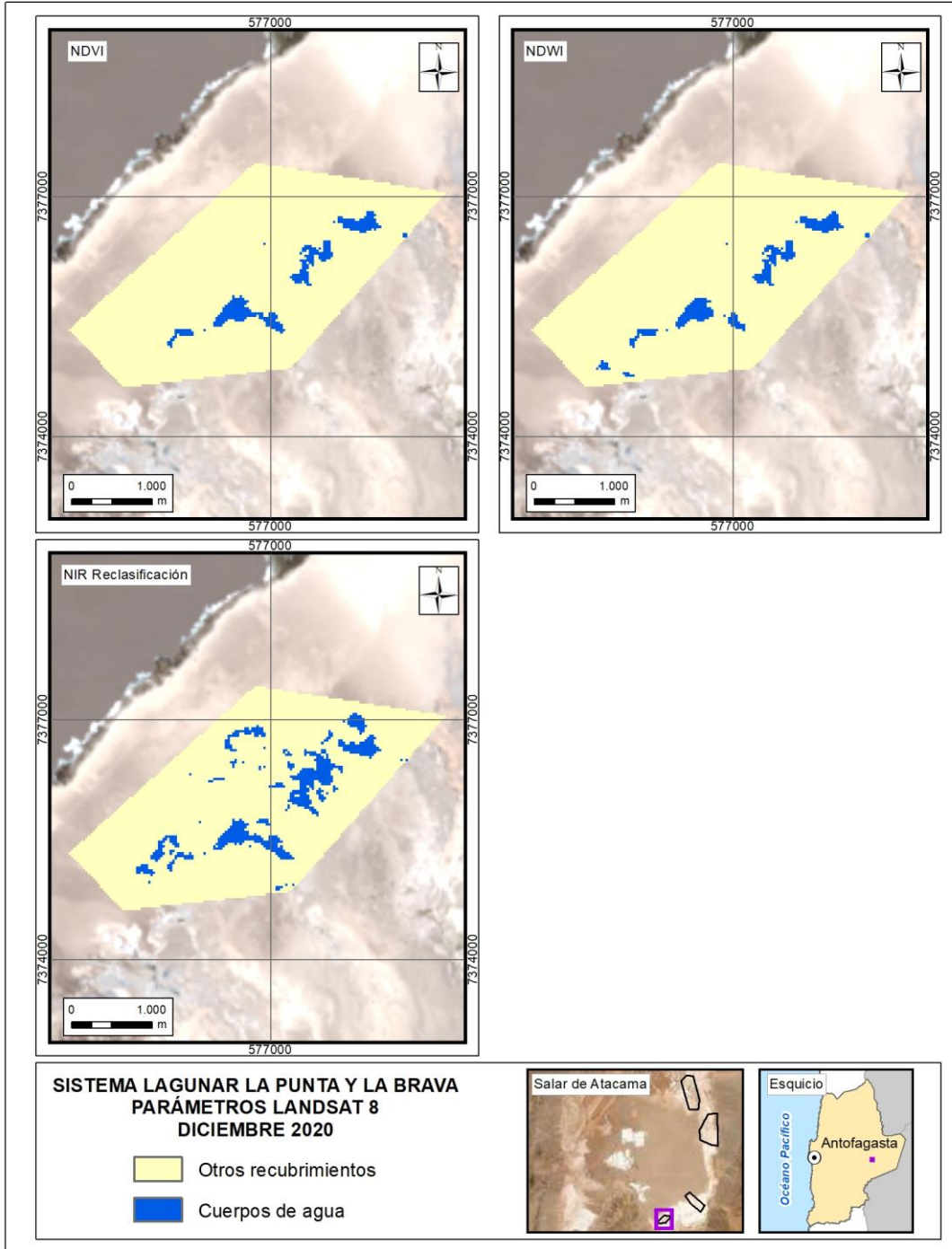
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-16. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes PLEIADES 1A, invierno 2020.



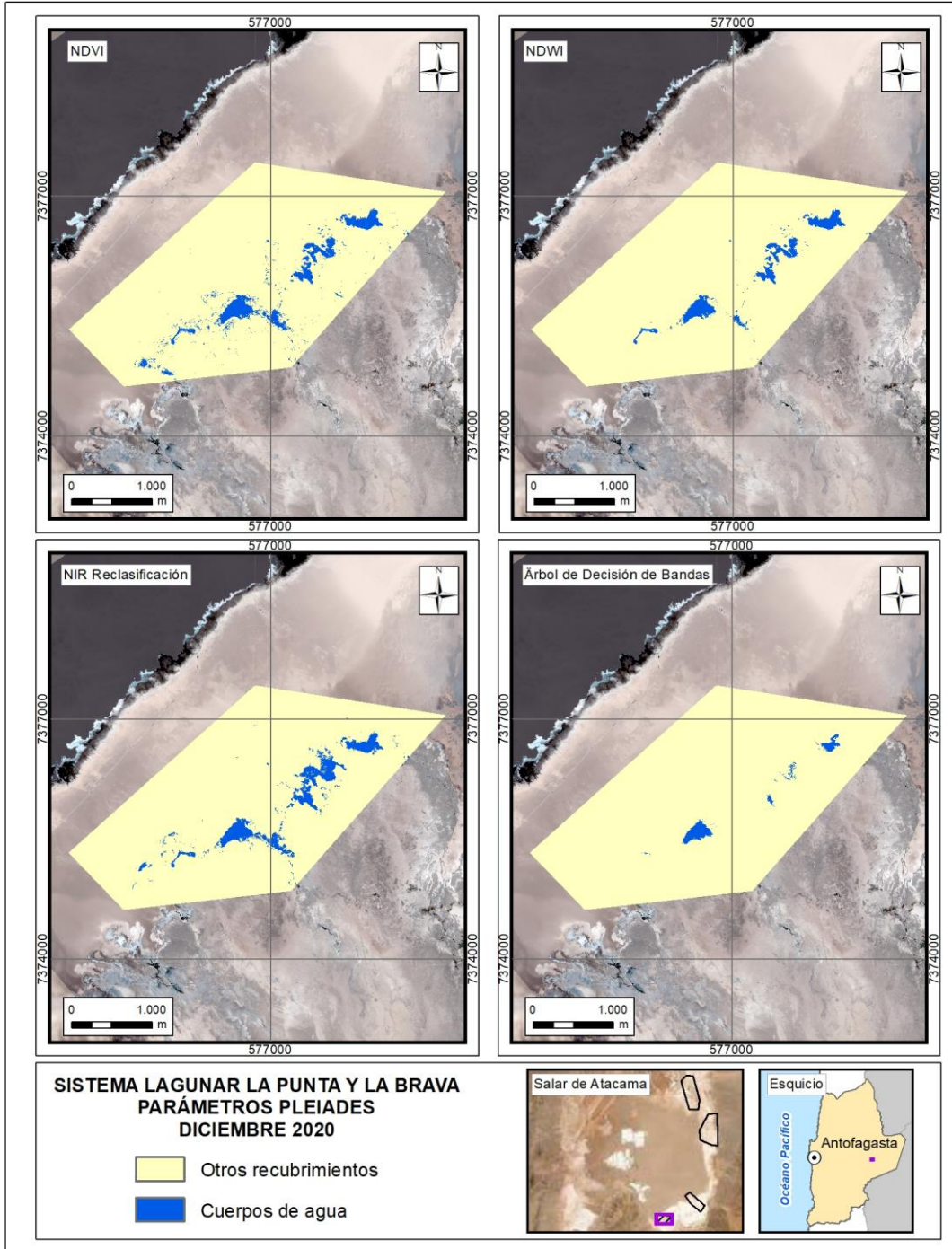
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-17. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes LANDSAT 8, verano 2020.



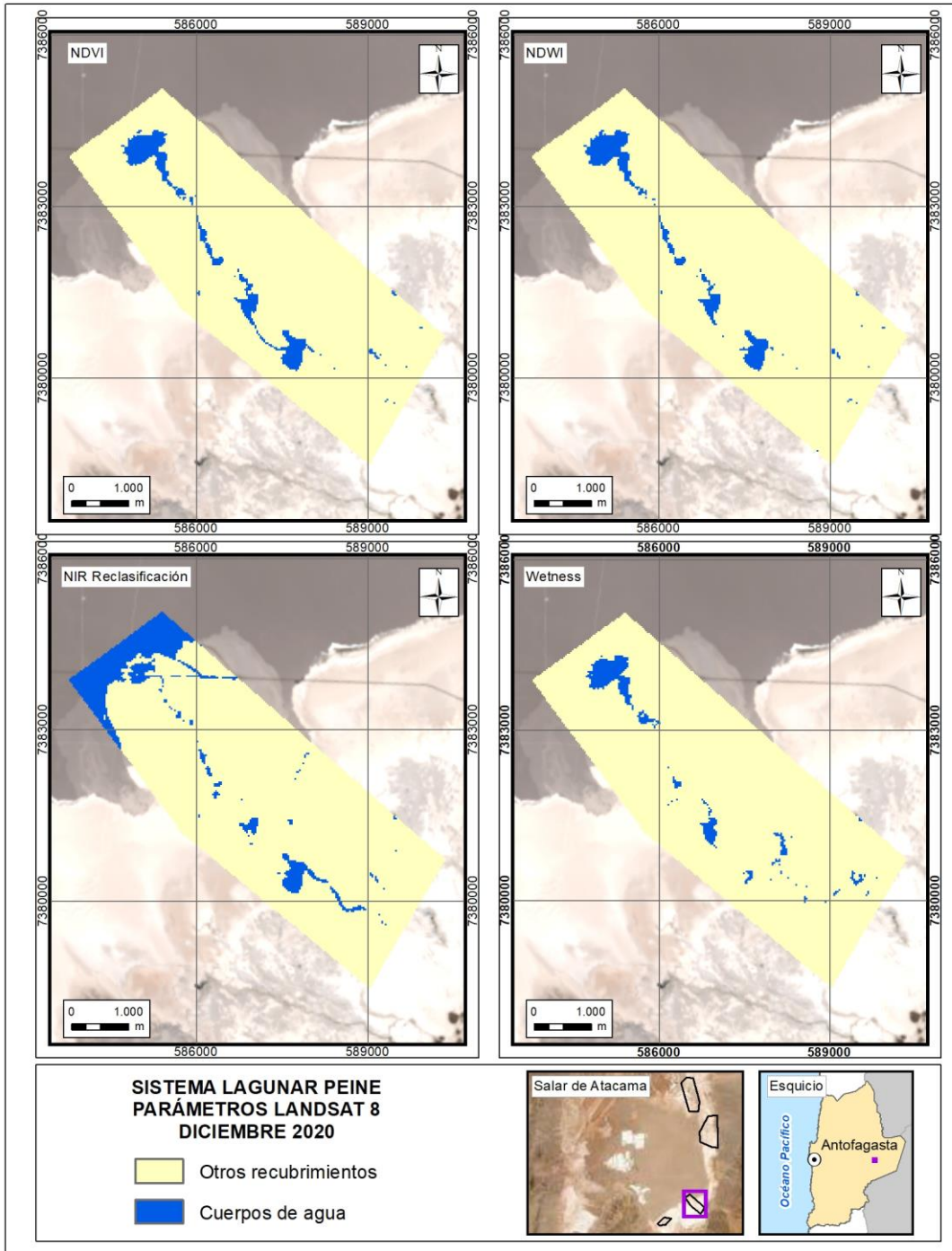
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-18. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes PLEIADES 1A, verano 2020.



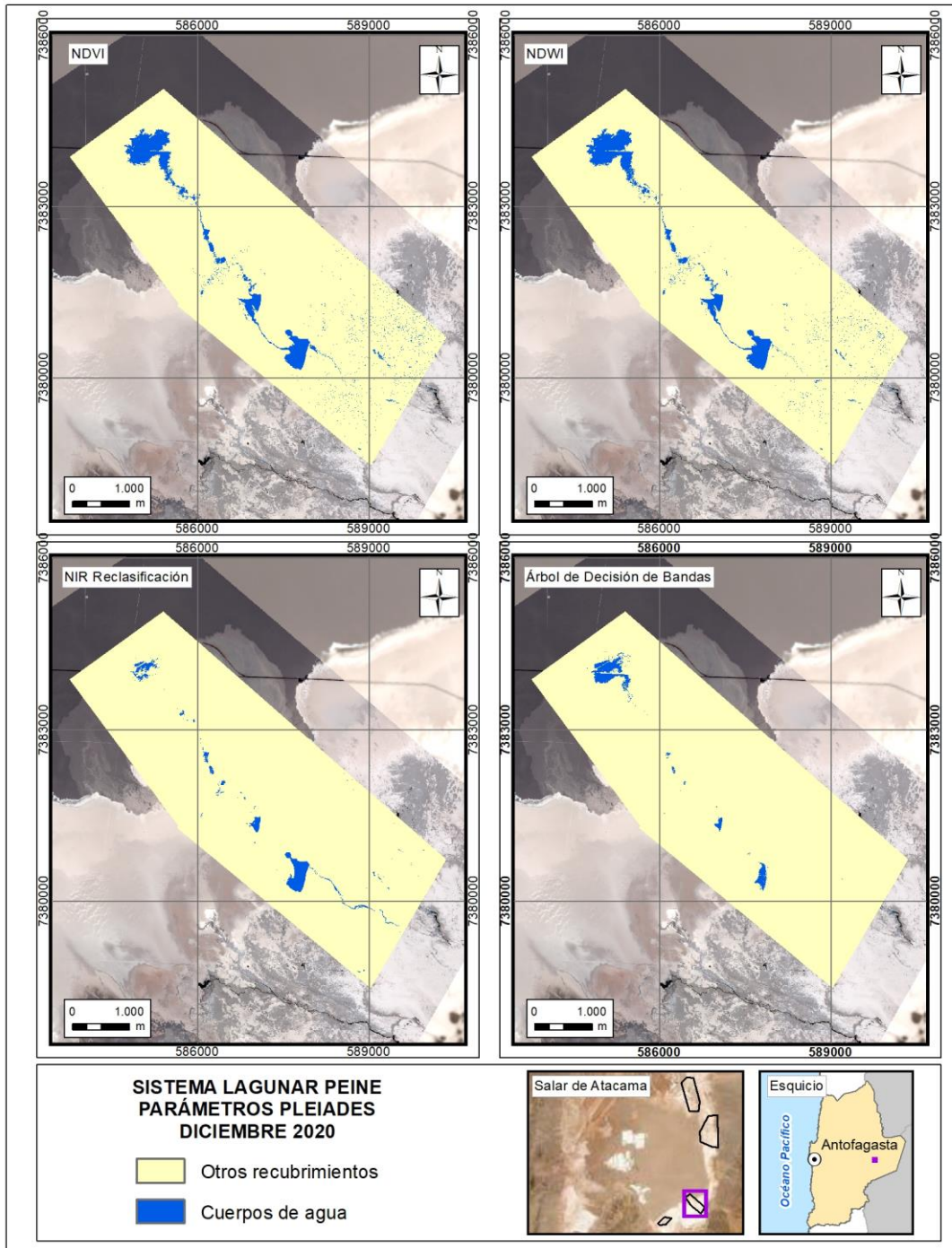
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-19. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes LANDSAT 8, verano 2020.



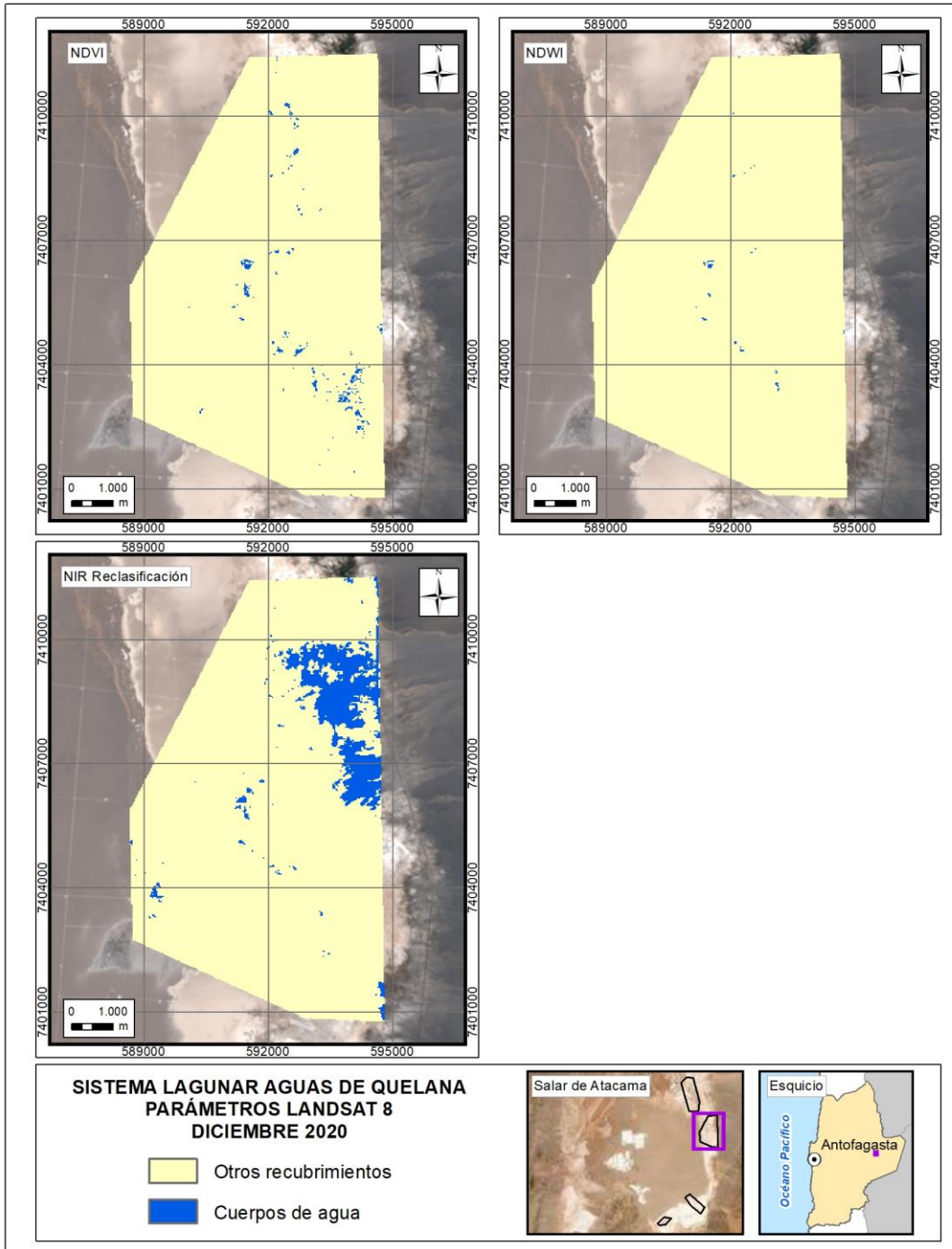
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-20. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes PLEIADES 1A, verano 2020.



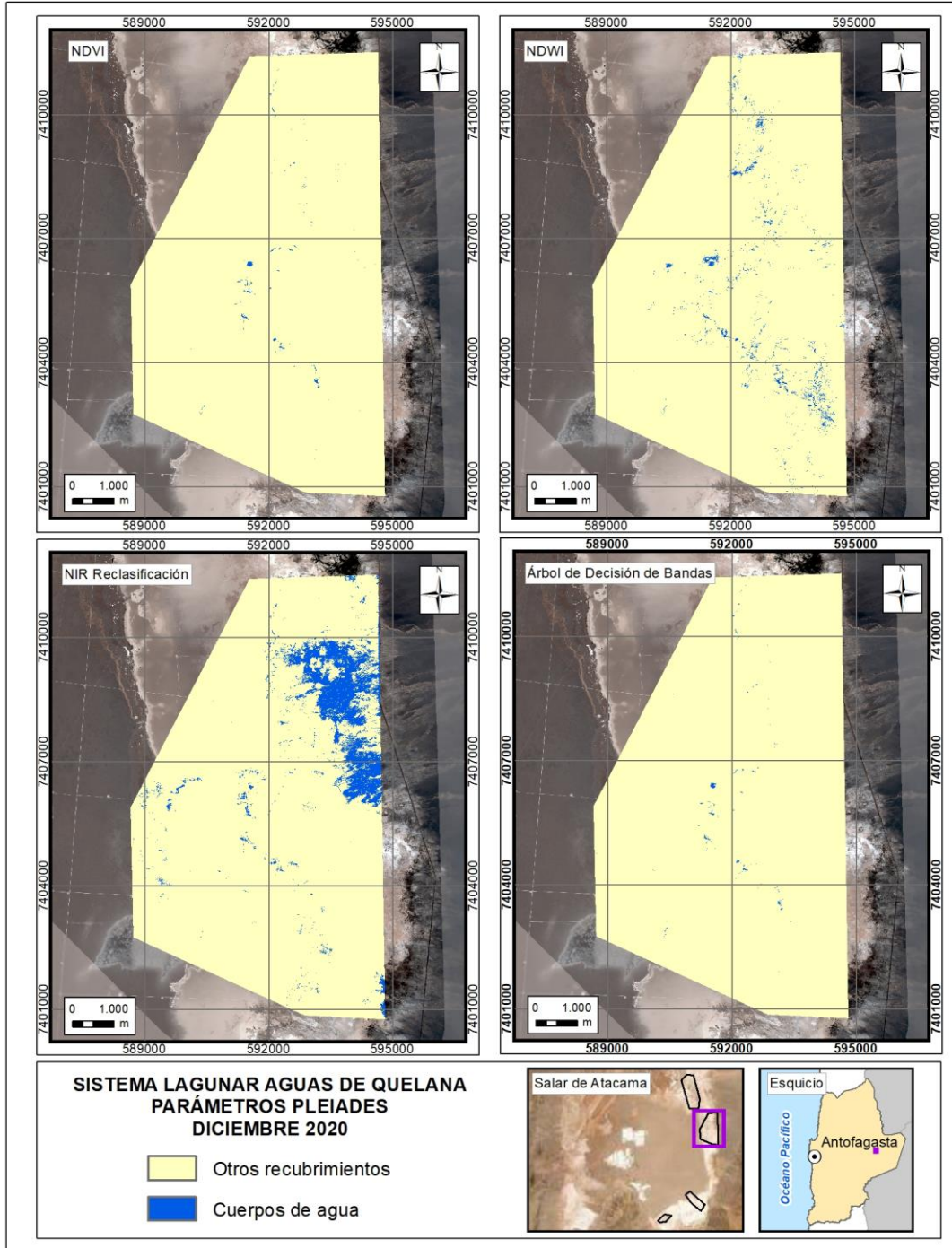
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-21. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes LANDSAT 8, verano 2020.



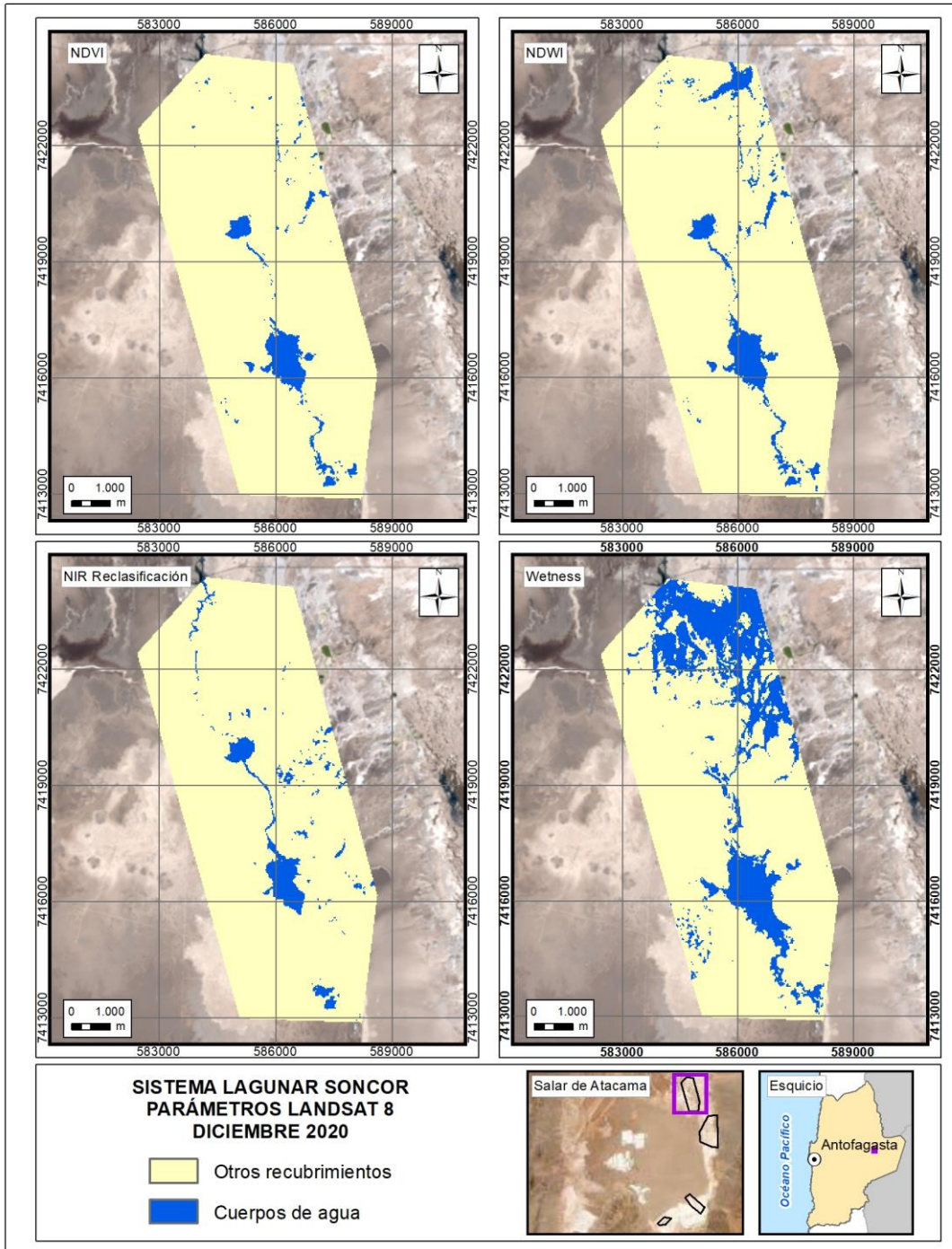
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-22. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes PLEIADES 1A, verano 2020.



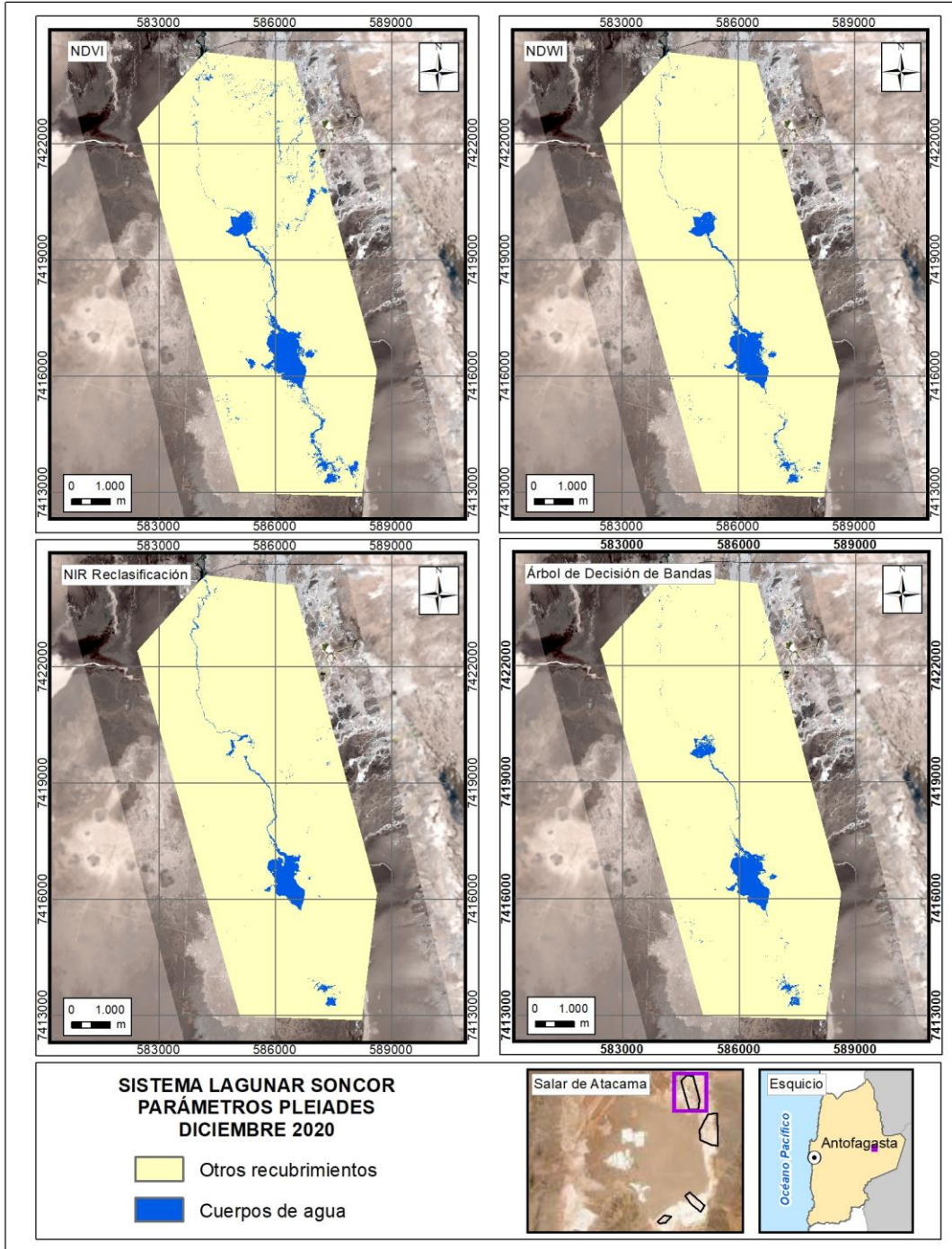
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-23. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes LANDSAT 8, verano 2020.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-24. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes PLEIADES 1A, verano 2020.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-25. Carta N°78/2020 de la Comunidad de Peine.

N° 78/2020
Peine, 1 de Diciembre de 2020

Señor:

Manuel Zamora Pizarro

Asunto: Suspende actividades de Monitoreo en Lagunas de Peine

Subgerente de Relaciones Comunitarias

Albemarle

Presente

Mediante la presente, queremos informar la suspensión de las actividades de monitoreo en el sector de las Lagunas de Peine, sistema hídrico compuesto por las lagunas Salada-Saladita-Interna. Como es de público conocimiento, el sistema en mención es una zona identificada entre los sitios de reproducción y nidificación¹ de flamencos, especie importantísima dentro de la cosmovisión andina y particularmente de la Comunidad que presido, actividad que ocurre entre los meses de octubre-noviembre y febrero. En este sentido, en las zonas donde CONAF posee administración o coadministración, como lo es en la Reserva Nacional Los Flamencos, se establecen medidas de restricción de acceso a estos sectores, como lo son Puilar o Barros Negros, lo que quedó establecido en la Resolución N°56/2019 de CONAF².

Así mismo, estamos en desarrollo de instrumentos que nos permitan ordenar el acceso al sector de las lagunas La Punta y La Brava, debido a los descubrimientos científicos realizados en el sector y que hacen urgente el desarrollo de medidas de protección en el sector, por lo que solicitamos realizar las actividades con el mayor de los cuidados.

La restricción regirá hasta el 28 de febrero del 2021, pudiéndose extender dependiendo de la evaluación que se haga de la actividad reproductiva (éxito de la campaña, formación de crechés, entre otros factores), en el lugar.

¹ Red de Humedales de Importancia para la Conservación de los Flamencos Altoandinos, GCFA. Convención Sobre las Especies Migratorias. Memorando de Entendimiento sobre la Conservación de Flamencos Altoandinos y de sus Hábitats. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente(PNUMA), Convención de Bonn(CMS). Informe 4, 23 de febrero del 2016. Pp. 35.

² Resolución N°56/2019 de CONAF, que aprueba protocolo de ingreso a sectores N°4,6 y 7 de la Reserva Nacional Los Flamencos en coadministración entre CONAF y la Comunidad Atacameña de Toconao.



Nº 78/2020
Peine, 1 de Diciembre de 2020

Sin otro particular, reciba usted nuestro cordial saludo.

Amanda Barrera Conzué
Presidenta



Comunidad Atacameña de Peine

C.c.:
- Archivo Comunidad.

ANEXO 9-26. Carta CONAF que indica permanencia de cierre de ASP Región de Antofagasta.

15-06-2020

www.ceropapel.conaf.cl/documentos/documento.php?idDocumento=137464840**CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL
REGIÓN DE ANTOFAGASTA
DIRECCIÓN REGIONAL ANTOFAGASTA
TGM/RCC/DRS****CARTA OFICIAL N° 10/2020****ANTOFAGASTA, 11/06/2020****SEÑOR
IGNACIO TORO
GERENTE MEDIO AMBIENTE
ALBEMARLE LIMITADA
AVDA HÉCTOR GÓMEZ COBO 975
ANTOFAGASTA**

Junto con saludarlo cordialmente y de acuerdo a solicitud de permiso para ingreso a la Reserva Nacional Los Flamencos sectores Soncor, Aguas de Quelana y acompañamiento de Guardaparques en las actividades de monitoreo ambiental a efectuarse en los meses de julio, agosto y septiembre 2020, en carta emitida con fecha 12 de junio 2020, informo que las Áreas Silvestres Protegidas permanecen cerradas hasta nuevo aviso, esto por resolución N° 160/2020 y N° 162/2020, emitido con fecha 18 de marzo 2020 por el Director Ejecutivo de la Corporación Nacional Forestal.

Informaremos sobre reapertura de Áreas Protegidas, con ello se podrá coordinar la ejecución de estas actividades en el interior de la Reserva Nacional Los Flamencos.

Saluda atentamente a usted

**CRISTIÁN SALAS PAPASIDERIS
DIRECTOR REGIONAL
DIRECCIÓN REGIONAL ANTOFAGASTA**

ANEXO 9-27. Imágenes Landsat 2019 – 2020 – Análisis NDWI.

Producto/Sensor	ID - LANDSAT	Fecha de adquisición	*Cobertura nubosa
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20190718_20190731_01_T1	18-07-2019 14:20:06	1,25
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20190803_20190819_01_T1	03-08-2019 14:20:13	1,25
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20190819_20190902_01_T1	19-08-2019 14:20:19	1,09
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20190904_20190917_01_T1	04-09-2019 14:20:22	8,14
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20190920_20190926_01_T1	20-09-2019 14:20:28	2,11
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20191006_20191018_01_T1	06-10-2019 14:20:32	1,44
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20191022_20191030_01_T1	22-10-2019 14:20:33	1,01
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20191107_20191115_01_T1	07-11-2019 14:20:32	0,4
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20191123_20191203_01_T1	23-11-2019 14:20:28	2,98
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20191209_20191217_01_T1	09-12-2019 14:20:28	0,84
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20191225_20200110_01_T1	25-12-2019 14:20:25	2,11
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200110_20200114_01_T1	10-01-2020 14:30:48	17
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200126_20200210_01_T1	26-01-2020 14:30:44	14
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200211_20200225_01_T1	11-02-2020 14:30:39	2
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200227_20200313_01_T1	27-02-2020 14:30:35	0
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200314_20200325_01_T1	14-03-2020 14:30:28	5
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200330_20200410_01_T1	30-03-2020 14:30:19	1
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200415_20200423_01_T1	15-04-2020 14:30:12	1
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200501_20200509_01_T1	01-05-2020 14:30:00	0,9
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200517_20200527_01_T1	17-05-2020 14:30:00	0,85
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200602_20200608_01_T1	02-06-2020 14:30:07	4
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200618_20200625_01_T1	18-06-2020 14:30:17	1
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200704_20200708_01_T1	04-07-2020 14:30:25	1
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200805_20200821_01_T1	05-08-2020 14:30:34	1
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200821_20200905_01_T1	21-08-2020 14:30:41	2
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200906_20200918_01_T1	06-09-2020 14:30:48	4
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20200922_20201006_01_T1	22-09-2020 14:30:53	4
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20201024_20201105_01_T1	24-10-2020 14:30:56	1
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20201109_20201212_01_T1	09-11-2020 14:30:54	1
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20201125_20201211_01_T1	25-11-2020 14:30:57	0
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20201211_20201218_01_T1	11-12-2020 14:30:00	0,43
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20201227_20201227_01_RT	27-12-2020 14:30:55	19
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180104_20180118_01_T1	04-01-2018 14:20:17	0,89
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180120_20180206_01_T1	20-01-2018 14:20:09	4,26
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180205_20180221_01_T1	05-02-2018 14:20:01	21,42
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180221_20180308_01_T1	21-02-2018 14:19:55	0,77
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180309_20180320_01_T1	09-03-2018 14:19:47	0,77
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180325_20180404_01_T1	25-03-2018 14:19:39	3,02

Producto/Sensor	ID - LANDSAT	Fecha de adquisición	*Cobertura nubosa
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180410_20180417_01_T1	10-04-2018 14:19:31	1,33
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180426_20180502_01_T1	26-04-2018 14:19:22	42,69
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180512_20180517_01_T1	12-05-2018 14:19:12	1,09
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180528_20180605_01_T1	28-05-2018 14:18:59	0,9
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180613_20180703_01_T1	13-06-2018 14:19:02	4,85
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180629_20180716_01_T1	29-06-2018 14:19:12	2,63
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180715_20180730_01_T1	15-07-2018 14:19:20	2,8
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180731_20180814_01_T1	31-07-2018 14:19:27	3,6
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180816_20180829_01_T1	16-08-2018 14:19:36	3,68
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180901_20180912_01_T1	01-09-2018 14:19:43	2,5
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20180917_20180928_01_T1	17-09-2018 14:19:47	1,7
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20181003_20181010_01_T1	03-10-2018 14:19:55	2,49
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20181019_20181031_01_T1	19-10-2018 14:20:01	0,88
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20181104_20181115_01_T1	04-11-2018 14:20:05	0,62
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20181120_20181129_01_T1	20-11-2018 14:20:05	1,31
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20181206_20181211_01_T1	06-12-2018 14:20:03	0,97
L8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_233076_20181222_20181227_01_T1	22-12-2018 14:20:02	0,99

*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.

Anexo C-2

Registros Superficies Lagunares

Anexo C: Superficie cubierta por Lagunas

Nombre	Fecha	Superficie (m2)	Imagen Satelital	Fuente
Lag Aguas de Quelana	01-03-2006	120.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.10), Anexo 2 Adenda5
Lag Aguas de Quelana	01-03-2007	113.000	Minima Historica) Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.10), Anexo 2 Adenda5
Lag Aguas de Quelana	01-04-2011	331.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.10), Anexo 2 Adenda5
Lag Aguas de Quelana	01-04-2013	246.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.10), Anexo 2 Adenda5
Lag Aguas de Quelana	12-04-2013	524.700	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	28-04-2013	748.800	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	14-05-2013	1.115.100	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	30-05-2013	1.602.900	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	15-06-2013	2.032.200	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	01-07-2013	1.748.700	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	17-07-2013	1.909.800	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	02-08-2013	1.944.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	18-08-2013	1.429.200	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	03-09-2013	835.200	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	19-09-2013	102.600	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	06-11-2013	216.900	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	22-11-2013	183.600	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	08-12-2013	89.100	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	24-12-2013	140.400	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	09-01-2014	120.600	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	25-01-2014	0	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	10-02-2014	291.600	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	26-02-2014	294.300	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	14-03-2014	351.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	30-03-2014	379.800	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	15-04-2014	488.700	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	01-05-2014	641.700	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	17-05-2014	855.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	02-06-2014	1.087.200	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	18-06-2014	1.387.800	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	04-07-2014	1.260.900	LANDSAT 8	GSAM 2014
Lag Aguas de Quelana	01-04-2015	301.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.10), Anexo 2 Adenda5
Lag Aguas de Quelana	01-07-2016	334.000	Pleiades 1A AR 1	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	01-07-2016	582.000	Landsat 8 MR 2	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	15-12-2016	188.000	Pleiades 1A AR 1	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	15-12-2016	416.000	Landsat 8 MR 2	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	22-08-2017	1.229.000	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	29-08-2017	2.637.745	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	24-12-2017	1.036.933	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	30-12-2017	277.849	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	16-08-2018	885.805	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	17-08-2018	851.600	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	21-12-2018	129.619	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	22-12-2018	173.508	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	01-08-2019	577.948	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	01-08-2019	408.779	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	01-12-2019	398.028	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	01-12-2019	499.378	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	01-03-2006	489.000	Minima Historica) Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.8), Anexo 2 Adenda5
LAGUNAS PEINE	01-04-2010	712.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.8), Anexo 2 Adenda5
LAGUNAS PEINE	01-04-2011	736.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.8), Anexo 2 Adenda5
LAGUNAS PEINE	01-04-2013	655.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.8), Anexo 2 Adenda5
LAGUNAS PEINE	12-04-2013	610.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	28-04-2013	620.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	14-05-2013	630.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	30-05-2013	710.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	15-06-2013	770.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	01-07-2013	730.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	17-07-2013	710.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	02-08-2013	730.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	18-08-2013	700.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	03-09-2013	710.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	06-11-2013	620.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	22-11-2013	600.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	24-12-2013	570.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	09-01-2014	580.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	10-02-2014	570.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	26-02-2014	570.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	14-03-2014	540.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	30-03-2014	570.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	15-04-2014	560.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	01-05-2014	580.000	LANDSAT 8	GSAM 2014

Anexo C: Superficie cubierta por Lagunas

Nombre	Fecha	Superficie (m2)	Imagen Satelital	Fuente
LAGUNAS PEINE	17-05-2014	570.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	02-06-2014	590.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	18-06-2014	570.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	04-07-2014	590.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
LAGUNAS PEINE	01-07-2016	741.000	Pleiades 1A AR 1	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	01-07-2016	1.147.000	Landsat 8 MR 2	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	15-12-2016	502.000	Pleiades 1A AR 1	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	15-12-2016	1.103.000	Landsat 8 MR 2	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	22-08-2017	746.230	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	29-08-2017	1.045.919	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	24-12-2017	753.464	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	30-12-2017	740.682	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	16-08-2018	783.552	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	17-08-2018	514.826	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	21-12-2018	493.949	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	22-12-2018	817.110	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	01-08-2019	866.637	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	01-08-2019	851.021	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	01-12-2019	1.016.804	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	01-12-2019	1.078.117	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	30-03-1985	1.566.500	LANDSAT 5 TM	EIA ROCKWOOD 2009 ADENDA 2
PUNTA BRAVA	24-02-1990	766.000	LANDSAT 5 TM	EIA ROCKWOOD 2009 ADENDA 2
PUNTA BRAVA	02-05-1997	4.556.400	LANDSAT 5 TM	EIA ROCKWOOD 2009 ADENDA 2
PUNTA BRAVA	31-03-2000	953.700	LANDSAT 7 + ETM	EIA ROCKWOOD 2009 ADENDA 2
PUNTA BRAVA	21-03-2002	1.485.000	LANDSAT 7 + ETM	EIA ROCKWOOD 2009 ADENDA 2
PUNTA BRAVA	01-01-2007	342.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.7), Anexo 2 Adenda5
PUNTA BRAVA	01-04-2008	350.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.7), Anexo 2 Adenda5
PUNTA BRAVA	14-04-2008	998.700	LANDSAT 7 + ETM	EIA ROCKWOOD 2009 ADENDA 2
PUNTA BRAVA	01-01-2010	342.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.7), Anexo 2 Adenda5
PUNTA BRAVA	01-01-2012	341.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.7), Anexo 2 Adenda5
PUNTA BRAVA	12-04-2013	450.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	28-04-2013	500.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	14-05-2013	670.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	30-05-2013	970.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	15-06-2013	1.390.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	01-07-2013	1.130.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	17-07-2013	1.270.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	02-08-2013	1.260.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	18-08-2013	1.100.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	03-09-2013	880.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	06-11-2013	350.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	22-11-2013	330.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	08-12-2013	320.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	24-12-2013	280.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	09-01-2014	280.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	01-02-2014	316.000	Minima Historica) Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.7), Anexo 2 Adenda5
PUNTA BRAVA	10-02-2014	310.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	26-02-2014	330.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	14-03-2014	370.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	30-03-2014	430.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	15-04-2014	450.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	01-05-2014	510.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	17-05-2014	650.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	02-06-2014	910.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	18-06-2014	1.000.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	04-07-2014	1.030.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
PUNTA BRAVA	01-07-2016	474.000	Pleiades 1A AR 1	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	01-07-2016	626.000	Landsat 8 MR 2	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	15-12-2016	409.000	Pleiades 1A AR 1	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	15-12-2016	550.000	Landsat 8 MR 2	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	22-08-2017	481.107	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	29-08-2017	381.695	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	24-12-2017	393.277	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	30-12-2017	486.229	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	16-08-2018	637.302	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	17-08-2018	619.321	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	21-12-2018	358.729	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	22-12-2018	443.993	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	01-08-2019	528.462	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	01-08-2019	537.733	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	01-12-2019	627.220	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	01-12-2019	576.515	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM

Anexo C: Superficie cubierta por Lagunas

Nombre	Fecha	Superficie (m2)	Imagen Satelital	Fuente
SONCOR	01-03-2007	1.924.000	Minima Historica) Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.9), Anexo 2 Adenda5
SONCOR	01-04-2010	2.028.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.9), Anexo 2 Adenda5
SONCOR	01-04-2011	2.339.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.9), Anexo 2 Adenda5
SONCOR	01-04-2013	2.342.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.9), Anexo 2 Adenda5
SONCOR	12-04-2013	1.710.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	28-04-2013	2.020.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	14-05-2013	2.110.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	30-05-2013	2.500.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	15-06-2013	2.680.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	01-07-2013	2.440.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	17-07-2013	2.540.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	02-08-2013	2.440.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	18-08-2013	2.370.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	03-09-2013	2.360.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	06-11-2013	1.550.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	22-11-2013	1.490.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	08-12-2013	1.300.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	24-12-2013	1.300.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	09-01-2014	1.280.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	10-02-2014	1.370.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	26-02-2014	1.400.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	14-03-2014	1.490.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	30-03-2014	1.580.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	01-04-2014	2.238.000	Satélite alta resolución (QuickBird/Worldview/GeoEye)	CEA_Apendice B (Tabla 4.9), Anexo 2 Adenda5
SONCOR	15-04-2014	1.710.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	01-05-2014	1.860.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	17-05-2014	1.990.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	02-06-2014	2.000.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	18-06-2014	2.100.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	04-07-2014	2.200.000	LANDSAT 8	GSAM 2014
SONCOR	01-07-2016	2.589.000	Pleiades 1A AR 1	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
SONCOR	01-07-2016	2.699.000	Landsat 8 MR 2	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
SONCOR	15-12-2016	2.556.000	Pleiades 1A AR 1	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
SONCOR	15-12-2016	2.338.000	Landsat 8 MR 2	Geosoluciones Ltda. y Reporte CEDREM
SONCOR	22-08-2017	3.363.000	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	29-08-2017	3.932.980	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	24-12-2017	1.896.512	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	30-12-2017	2.202.981	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	16-08-2018	2.960.945	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	17-08-2018	2.576.415	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	21-12-2018	1.640.584	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	22-12-2018	2.552.764	Landsat 8 MR 2	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	01-08-2019	2.328.853	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	01-08-2019	2.343.328	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	01-12-2019	2.164.604	Pleiades 1A AR 1	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	01-12-2019	2.481.803	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	01-08-2020	187.457	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	01-08-2020	514.418	Pleiades 1A AR	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	01-08-2020	600.191	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	01-08-2020	542.094	Pleiades 1A AR	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	01-08-2020	1.054.403	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	01-08-2020	2.552.516	Pleiades 1A AR	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	01-08-2020	3.315.701	Landsat 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	01-08-2020	171.739	Pleiades 1A AR	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	01-12-2020	284.173	Pleiades 1A AR	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	01-12-2020	734.638	Pleiades 1A AR	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	01-12-2020	85.441	Pleiades 1A AR	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	01-12-2020	1.689.478	Pleiades 1A AR	Apogeos y Reporte CEDREM
PUNTA BRAVA	01-12-2020	360.958	LANDSAT 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
LAGUNAS PEINE	01-12-2020	830.122	LANDSAT 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
Lag Aguas de Quelana	01-12-2020	84.780	LANDSAT 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM
SONCOR	01-12-2020	2.255.468	LANDSAT 8 MR	Apogeos y Reporte CEDREM