

“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)”

Rockwood Lithium

Determinación Espacio Temporal de Cuerpos de Agua en el Salar de Atacama



Región de Antofagasta

Febrero de 2017

ÍNDICE

1	RESUMEN	7
2	INTRODUCCIÓN	9
3	OBJETIVOS.....	11
4	MATERIALES Y MÉTODOS	12
4.1	Descripción del área de estudio	12
4.2	Parámetros utilizados para caracterizar el estado y seguimiento de los cuerpos de agua	14
4.3	Ubicación de los puntos de muestreo para validación de cuerpos de agua	14
4.4	Metodología de muestreo y/o medición.....	16
4.5	Metodología de análisis de las imágenes satelitales para delimitación de cuerpos de agua	17
4.5.1	Imágenes de alta resolución – Pleiades-1A	17
4.5.2	Imagen de resolución media – LANDSAT 8.....	20
4.5.3	Procesamiento de las imágenes satelitales	21
4.5.4	Descripción del Modelo de Clasificación Supervisada de cuerpos de agua.....	22
4.5.5	Parámetros espectrales del modelo de clasificación.....	23
4.5.6	Umrales y validación del modelo de clasificación	25
4.5.7	Depuración cartográfica de cuerpos de agua.....	27
4.5.8	Ajuste a cuerpos de agua del primer monitoreo por validación complementaria 28	28
4.6	Análisis comparativo para seguimiento de la cobertura de cuerpos de agua	29
4.7	Materiales y equipos utilizados.....	29
4.8	Fechas de medición.....	30
5	RESULTADOS	30
5.1	Validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua	30
5.2	Superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar	34
5.2.1	Aguas de Quelana	35
5.2.2	La Punta y La Brava	39
5.2.3	Peine.....	44
5.2.4	Soncor.....	48
6	DISCUSION	52
6.1	Análisis de la validación del modelo de clasificación de la cobertura de cuerpos de agua	52
6.2	Análisis de comparación con registros históricos de línea de base	54

6.3	Análisis de límites considerados en el seguimiento de los cuerpos de agua.....	55
7	CONCLUSIONES	55
8	REFERENCIAS	57
9	ANEXOS	59
	ANEXO 9-1. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes LANDSAT 8. .	59
	ANEXO 9-2. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes PLEIADES 1A.	60
	ANEXO 9-3. Coordenadas de puntos de validación en terreno	61
	ANEXO 9-4. Cuadro comparativo de diferencias implementadas en el estudio actual respecto a la línea de base (Adenda 5 RWL, 2015).....	61
	ANEXO 9-5. Metadatos de Imágenes de alta resolución – Pleiades 1A.....	62
	ANEXO 9-6. Metadatos de Imágenes de media resolución – Landsat	62
	ANEXO 9-7. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Aguas de Quelana - imágenes Pleiades 1A.....	63
	ANEXO 9-8. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Aguas de Quelana - imágenes Landsat 8.	64
	ANEXO 9-9. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar La Punta y La Brava - imágenes Pleiades 1A.....	65
	ANEXO 9-10. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar La Punta y La Brava - imágenes Landsat 8.	66
	ANEXO 9-11. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Peine - imágenes Pleiades 1A.	67
	ANEXO 9-12. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Peine - imágenes Landsat 8.....	68
	ANEXO 9-13. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Soncor - imágenes Pleiades 1A. ...	69
	ANEXO 9-14. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Soncor - imágenes Landsat 8.	70
	ANEXO 9-15. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes LANDSAT 8.....	71
	ANEXO 9-16. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes PLEIADES 1A.	72
	ANEXO 9-17. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes LANDSAT 8.	73
	ANEXO 9-18. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes PLEIADES 1A.....	74

ANEXO 9-19. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes LANDSAT 8.	75
ANEXO 9-20. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes PLEIADES 1A.	76
ANEXO 9-21. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes LANDSAT 8.	77
ANEXO 9-22. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes PLEIADES 1A.	78

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. .	13
Figura N° 4-2. Ejemplo de mosaico, obtenido a partir del levantamiento fotogramétrico por sistema de dron ala fija en el sector Soncor.	17
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. .	19
Figura N° 4-4. Ejemplo Imagen Landsat 8 (Banda 5) correspondiente al cuadrante que incluye el área de estudio.	20
Figura N° 4-5. Modelo conceptual de árbol de decisiones usado para la clasificación supervisada de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales.	22
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>).	28
Figura N° 4-7. Equipos utilizados en levantamiento fotogramétrico: Dron de ala fija o UAV (<i>Unmanned Aerial Vehicle</i> , izquierda) y estación de control de vuelo (derecha)	30
Figura N° 5-1. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Aguas de Quelana.	36
Figura N° 5-2. Registros históricos y superficie actual de los cuerpos de agua, sistema lagunar Aguas de Quelana.	37
Figura N° 5-3. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Pleiades 1A.	38
Figura N° 5-4. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Landsat 8.	39
Figura N° 5-5. 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.	41
Figura N° 5-6. Registros históricos y superficie actual de los cuerpos de agua, sistema lagunar La Punta y La Brava.	42
Figura N° 5-7. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector La Punta y La Brava, a partir de imágenes Pleiades 1A.	43
Figura N° 5-8. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector La Punta y La Brava, a partir de imágenes Landsat 8.	44
Figura N° 5-9. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades-1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Peine.	45

Figura N° 5-10. Registros históricos y superficie actual de los cuerpos de agua, sistema lagunar Peine.	46
Figura N° 5-11. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1A.	47
Figura N° 5-12. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.	48
Figura N° 5-13. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Soncor.	49
Figura N° 5-14. Registros históricos y superficie actual de los cuerpos de agua, sistema lagunar Soncor.	50
Figura N° 5-15. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1A y Landsat 8.	51
Figura N° 5-16. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8.	52

TABLAS

Tabla N° 2-1. Resumen de Componentes y Variables	9
Tabla N° 2-2. Identificación de Instituciones y/o equipos de trabajo encargada de realizar el muestreo, medición, análisis y/o control.	10
Tabla N° 4-1. Número de puntos de muestreo catastrados en la campaña de diciembre 2016, 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.	15
Tabla N° 4-2. Características técnicas del sensor Pleiades-1A.	17
Tabla N° 4-3. Características técnicas de las bandas espectrales de la imagen Landsat 8	20
Tabla N° 4-4. Valores de los umbrales de clasificación de los parámetros espectrales usados, según el tipo de imagen satelital usada (Pleiades 1A y Landsat 8) para la delimitación de cuerpos de agua en los sistemas lagunares del Salar de Atacama en agosto y diciembre 2016.	25
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.	31
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.	32
Tabla N° 5-3. Variación en coberturas de invierno 2016 por muestreos complementarios realizados durante el actual monitoreo en los sistemas lagunares	33
Tabla N° 6-1. Consolidado de índices <i>Kappa</i> de validación del modelo de clasificación por sistema lagunar.	53
Tabla N° 6-2. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales (Pleiades 1A y Landsat 8) y datos obtenidos en el monitoreo 2016 (invierno y verano), respecto de los registros de línea de base (Adenda 5 RWL, 2015).	54

FOTOGRAFIA

Fotografía N° 5-1. Principales variaciones en el tipo de recubrimiento de suelo obtenidas durante la validación complementaria: cuerpos de agua verificados sobre coberturas salinas (a) o con vegetación (b) en el sector Quelana; (c) y (d) representan *otros recubrimientos* –no cuerpos de agua- rectificados sobre zonas de napas someras y con desarrollo de tapete microbiano en el sector La Punta y La Brava. 34

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, 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, RWL), en los componentes de “Lagunas o Cuerpos de Agua”.

El propósito es determinar y hacer 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 diciembre de 2016.

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

- i) Trabajo en terreno para revalidación estacional y validación de puntos complementarios registrados en la campaña de agosto 2016, clasificando el recubrimiento de suelo en los puntos de muestreo señalados (según “*cuerpos de agua*” u “*otros recubrimientos*”);
- ii) Obtención y procesamiento de las imágenes satelitales en forma paralela a la campaña de terreno;
- iii) Desarrollo y validación del modelo de clasificación supervisada, lo cual conllevó primero la determinación de umbrales de clasificación de los parámetros espectrales vinculados (NDWI, NDVI, NIR, Transformada *Tasseled Cap* “*Wetness*” y Algebra de bandas espectrales en alta resolución), y seguido por una depuración cartográfica, permitiendo esto obtener las coberturas de lagunas por sector.

Los valores de ajuste se obtuvieron mediante el índice *Kappa*¹, los cuales dan cuenta de una precisión confiable de las coberturas obtenidas: Desde las imágenes Pleiades 1A el rango de valores *Kappa* fue entre 0,82 (La Punta y la Brava) y 0,91 (Peine); y en el caso de Landsat 8, la precisión fue levemente menor con valores entre 0,62 a 0,83. Las variaciones en el ajuste, se atribuyen principalmente a la fisonomía de los sistemas lagunares, determinando los mayores valores de *Kappa* en aquellos sectores que se encuentran total o parcialmente delimitados por 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.

En consideración que los modelos obtenidos presentan un buen ajuste, se propone continuar utilizando los ajustes metodológicos empleados desde el monitoreo de la fase de construcción y revalidados la fase de operación, los cuales consideraron aquellos utilizados en la línea de base, ajustándolos de manera de robustecer el modelo. Los principales ajustes metodológicos realizados se refieren al procesamiento de las imágenes aplicando el método de corrección atmosférica

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 un mejor ajuste entre los elementos de clasificación.

ATCOR (por su sigla en inglés, *Atmospheric & Topographic Correction*) y además de incorporar parámetros espectrales al modelo de clasificación (NDVI en Pleiades-1A y Landsat 8, y la transformada *Tasseled Cap*, Wetness en Landsat 8). Los ajustes empleados, responden a mejorar la precisión del modelo de clasificación y realizar la validación del mismo.

Las superficies lagunares estimadas en este monitoreo desde imágenes de alta resolución, correspondieron a: (1) 18,8 ha en Aguas de Quelana, (2) 40,9 ha en La Punta y La Brava, (3) 50,2 ha en Peine y (4) 255,6 ha Soncor.

En relación al análisis comparativo de las superficies con la línea de base, es posible señalar que las superficies de los cuerpos de agua se encuentran dentro de los límites de seguimiento establecidos. En los cuatro sistemas lagunares, las coberturas están por encima de los registros mínimos de línea de base, donde las diferencias porcentuales corresponden a un rango entre un 66,4% (Aguas de Quelana) y un 2,7% (Peine). Estas se atribuyen principalmente a las variaciones estacionales intranuales, interanuales, mejoras metodológicas y validación complementaria ya mencionadas.

En relación al análisis comparativo entre las imágenes satelitales usadas en este análisis, se registra una sobrestimación de las coberturas en el caso de Landsat, con variaciones porcentuales registradas entre 9,32% (Soncor) y 54,73% (Aguas de Quelana), las cuales son esperables y atribuibles a diferencias en la resolución espacial entre las imágenes Landsat 8 y Pleiades 1-A. Por la misma razón y según la validación de los modelos, los registros de alta resolución señalan mayor certidumbre en las coberturas determinadas.

En relación al análisis comparativo entre monitoreo en etapa de construcción y monitoreo en primera fase del proceso de operación, cabe señalar que la presente determinación de áreas de las lagunas ha sido calculada para una condición de “verano” (mes de diciembre), la cual corresponde a una situación diferente a la caracterizada en la condición de línea de base del Proyecto, lo que concuerda con la variación en las tasas evaporativas bajas de la lámina libre registradas en la condición de “invierno” y las más altas registradas en el mes de diciembre. La diferencia porcentual en las superficies lagunares corresponde a un 32,3% (23,9 ha) en el sistema lagunar Peine, y un 13,9% (6,6 ha) en el sistema lagunar La Punta y La Brava; en ambos sistemas los valores son inferiores a las superficies calculadas para invierno 2016, que corresponde en menor medida a los ajustes metodológicos empleados y a la validación complementaria; lo que contribuyó con la depuración de los límites de los cuerpos de agua; prevaleciendo el registro de validación de terreno por sobre la clasificación final del recubrimiento de suelo del modelo de invierno 2016, en las zonas donde existen diferencias de recubrimientos de suelo entre la línea de base y la campaña señalada, lo que implica la calibración del modelo de clasificación en función de lo observado en terreno.

Cabe destacar que los resultados obtenidos en el actual monitoreo fase de operación (que comenzó el 28 de septiembre 2016), que incluye en el análisis los resultados del monitoreo de la fase de construcción (agosto 2016) y la comparación con los registros obtenidos en la línea de base; en adelante deberán ser incluidos en la comparación con los registros que se obtengan en la etapa de seguimiento (establecida con frecuencia mínima semestral).

2 INTRODUCCIÓN

El Salar de Atacama, se encuentra ubicado en una cuenca endorreica tectónica, delimitada por la Cordillera de Los Andes (6.000 msnm) al Este, y por la Cordillera de Domeyko (3.000 msnm) 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. Una disminución en el nivel del acuífero y/o aporte hídrico, originaría la compresión de los cuerpos de agua, así como la reducción de la cobertura de vegetación azonal (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, RWL), para su componente biota, subcomponente “Lagunas o Cuerpos de Agua” en su variable Superficie Cubierta por las Lagunas.

El propósito es determinar y hacer 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 satelitales multiespectrales con un pixel máximo de 4 metros, es decir de alta resolución, utilizando el sensor Pleiades 1A y de mediana resolución de acceso público del sensor Landsat 8, obtenidas en diciembre de 2016.

Este informe corresponde al monitoreo y seguimiento ambiental de las “Lagunas o Cuerpos de Agua”, medición de verano, durante la Fase de Operación (diciembre 2016).

Como se ha dicho, la variable ambiental asociada, corresponde a las superficies de las lagunas o la medición de las áreas de los cuerpos de aguas de los sistemas lagunares mencionados, cuya medición o seguimiento se debe realizar a través del análisis de imágenes satelitales de alta resolución, según metodología “Modificación del Índice Normalizado de diferencias de agua (NDWI)”, 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 de la componente y la variable ambiental del proyecto que se monitorea, 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	Análisis de imágenes satelitales de alta resolución, multiespectrales con un pixel máx. de 4 metros, que incluirán los cuatro sistemas lagunares. Metodología Modificación del Índice Normalizado de diferencias de agua (NDWI). Anexo 3 PSAH. 3.2.6 Superficie Cubierta por Lagunas, pág. 22. Adenda 5 RWL, (2015).

Las superficies de las lagunas, se asocian también con los niveles medidos en las mismas², parámetro establecido en el acápite de Variables de Medición, del Anexo 3 – Plan de Seguimiento Ambiental y Plan de Alerta Temprana de los Recursos Hídricos (Adenda 5 RWL, 2015). Los niveles de las lagunas (Nivel freático), Vegetación Azonal y Superficie de las lagunas, componen las 3 variables de estado indicativas, establecidas para el seguimiento y análisis del estado ecológico del Sistema (Ref. Cap-4.2.7 Criterios para detección de cambio de estado ecológico - Adenda 5 RWL, 2015)

El período reportado, corresponde a la campaña de “verano”, realizada en el mes de diciembre 2016; durante la primera fase de operación del proyecto. Este periodo de monitoreo quedó establecido, en el numeral 3.2.6 Superficie cubierta por lagunas, Tabla 3-1 Variables de monitoreo del PSAH.

Para el logro del objetivo propuesto, inicialmente se implementó un muestreo para validación estacional (réplicas de puntos invierno 2016) y la validación de puntos complementarios en terreno de los cuerpos de agua. 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 “Modificada de 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 de puntos estacional y complementaria en terreno	Especialista en terreno
	<u>Trabajo en gabinete:</u> implementación del modelo de clasificación supervisada y análisis de resultados.	Encargado del componente; Especialista en gabinete; Cartógrafo
Geosoluciones	<u>Medición:</u> Levantamiento RTK, y Levantamiento fotogramétrico.	Especialistas en terreno
	<u>Trabajo en gabinete:</u> Procesamiento de imágenes satelitales, adquisición y correcciones.	Especialistas en gabinete

Fuente: Cedrem Consultores

Este reporte describe los alcances metodológicos, los resultados y discusión para el estudio, partiendo con el análisis y validación del modelo de clasificación de los cuerpos de agua, el cual fue implementado en base a imágenes de alta resolución, Pleiades-1A y Landsat 8 (de media resolución), obtenidas durante diciembre de 2016. Posteriormente, se detallan los resultados de la cobertura determinada para los cuerpos de agua por sistema lagunar, desde imágenes de alta

² En el EIA se comprometen niveles para los sistemas (1) La Punta – La Brava; y (2) Peine.

resolución, comparándolos con los registros de línea de base y con la superficie determinada a partir de Landsat 8; hasta un análisis comparativo entre los monitoreos de invierno 2016 y verano 2016.

3 OBJETIVOS

El objetivo general correspondiente a *monitorear la cobertura o superficie de las lagunas o de los cuerpos de agua*, es para lograr detectar “cambios en el tamaño de éstas” lo cual determina modificaciones en su capacidad de carga, calidad de agua y también cambios estructurales y funcionales de los ecosistemas acuáticos (Ref. 4.2.7 Criterios para detección de cambio de estado ecológico; Adenda 5 RWL, 2015).

Como ya se ha mencionado, la medición se realiza a través de imágenes satelitales de alta resolución y el 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 de terreno y a la metodología “Modificada de 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, Soncor y Aguas de Quelana).
- 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 primera fase de operación del proyecto.
- Generar las coberturas de cuerpos de agua desde una imagen satelital de mediana resolución disponible, Landsat 8, para la primera fase de operación, y comparar éstas con los registros de las coberturas obtenidas a partir de las imágenes de alta resolución en cada sistema lagunar.³
- Contrastar las coberturas de los sistemas lagunares definidas para la fase de construcción con las coberturas de los sistemas lagunares definidas para la primera fase de operación, obtenidas desde imágenes satelitales de alta resolución y Landsat 8.

³ 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. Por lo mismo, una vez se cuente con los registros de monitoreos posteriores para ambos tipos de imágenes, se podrá determinar la correlación a través de un análisis estadístico de regresión.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del área de estudio

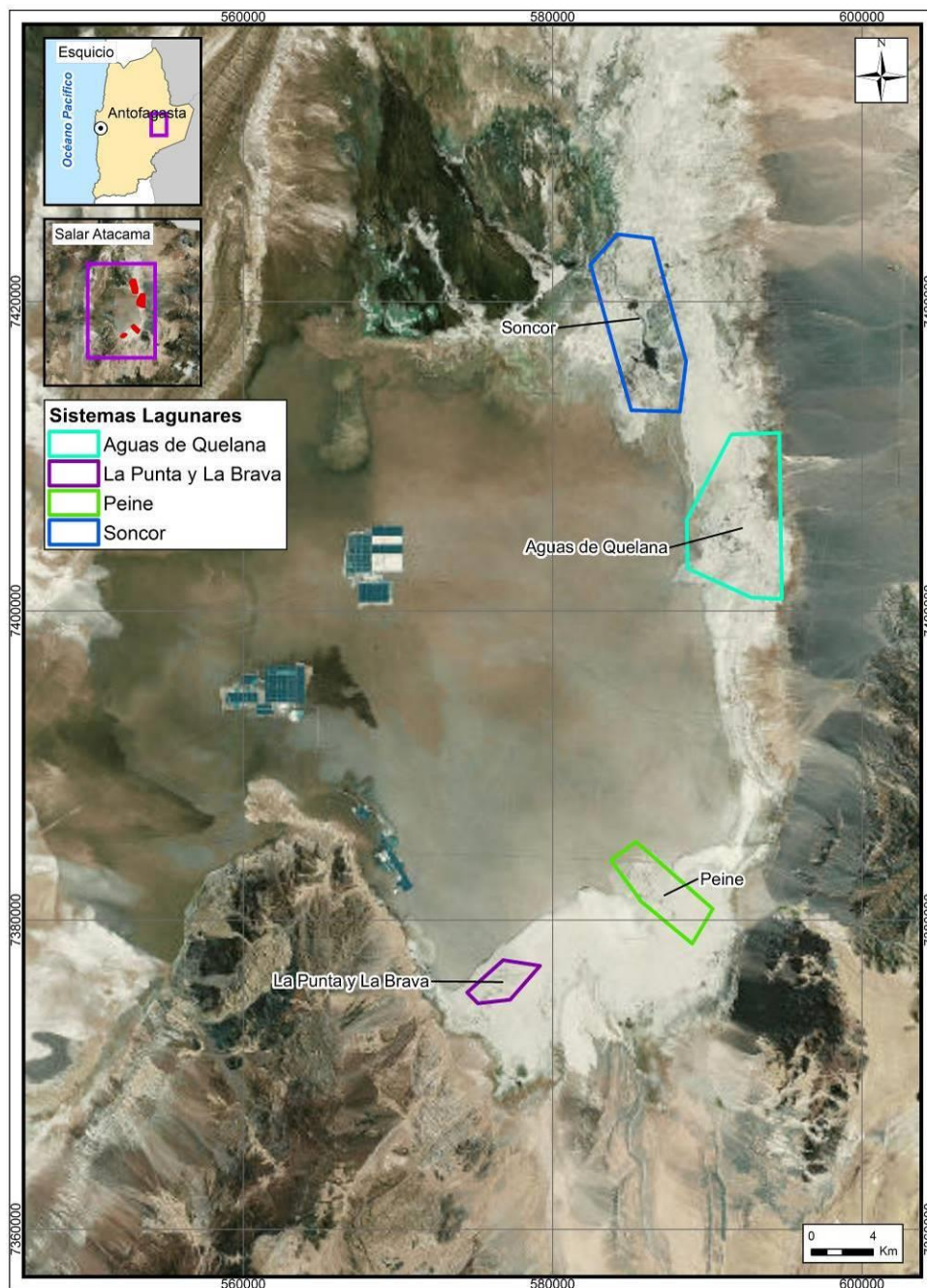
El área de estudio se sitúa en el Salar de Atacama, en la comuna de San Pedro de Atacama, Provincia de El Loa, extremo oriente de la II Región de Antofagasta y se encuentra a una altura geográfica aproximada de 2.300 m.s.n.m.

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 conforma un 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% del área de estudio total).
- 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 Rockwood Lithium 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, 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 de superficies de agua estimadas por sistema lagunar a través de imágenes satelitales. Esto en cumplimiento a lo dispuesto en la Adenda 5 y la RCA que aprueba al proyecto, donde se explica que *“se entenderá un cambio de tendencia si después de 3 años consecutivos, se observa una disminución de la superficie de las lagunas, fuera del rango de los valores registrados históricamente por sector”*, (Capítulo 4. Monitoreo Estado Ecológico; Adenda 5 RWL, 2015).

Según lo establecido por el la RCA N°21/2016 “durante la fase de operación y cierre del proyecto la superficie cubierta por lagunas debe mantener sus límites sobre el mínimo histórico”.

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 soportaron el proceso de calibración y validación del modelo de clasificación supervisada, usado para la determinación de la cobertura de cuerpos de agua a través de imágenes satelitales.

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 muestreo y por sistema lagunar de estudio.

El muestreo tuvo dos propósitos:

- i. Completar la estacionalidad de la validación comprometida en el análisis; es decir el muestreo del recubrimiento de suelo, por réplica a los puntos ejecutados durante la campaña de agosto 2016
- ii. Complementar la validación en zonas donde se determinaron las principales diferencias de la campaña de agosto 2016 con la línea de base y, de esta forma, ajustar y robustecer el modelo de clasificación para ambas fechas (invierno y verano).

La colección de datos se realizó en una campaña ejecutada en diciembre del 2016. En forma paralela se realizó la captura de las imágenes satelitales tanto de alta resolución (Pleiades-1A) como de Landsat 8 (detalles de distribución y coordenadas UTM 19S WGS84 de puntos en **ANEXO 9-1, ANEXO 9-2 y ANEXO 9-3**).

El diseño de muestreo implementado, corresponde al tipo *aleatorio –estratificado y estratificado-dirigido* mediante transectos, en todos los sistemas lagunares, criterio que se aplica producto de condiciones de seguridad por el limitado acceso y en base al conocimiento adquirido en la

campana pasada sobre estos sistemas lagunares. El tamaño de muestra, se calculó en base a 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 presenta el detalle del muestreo aplicado en cada sistema lagunar de estudio. Las diferencias en 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). Por lo mismo en gabinete para el caso de Landsat 8, se realizó una depuración a partir de los puntos de validación de las imágenes Pleiades-1A, de forma que el espaciamiento mínimo entre ellos fuera superior al tamaño de un pixel Landsat (30 m).

Tabla N° 4-1. Número de puntos de muestreo catastrados en la campana de diciembre 2016, 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	ESTRATIFICACIÓN POR RECURRIMIENTO DE SUELO	PUNTOS DE VALIDACIÓN (n)			
		PLEIADES 1A		LANDSAT 8	
		REPLICA ESTACIONAL	COMPLEMENTO*	REPLICA ESTACIONAL	COMPLEMENTO *
Aguas de Quelana	Otros recubrimientos	35	22	31	26
	Cuerpo de agua	22	5	17	10
	<i>Total tipo punto de validación</i>	57	27	48	36
	Total sistema lagunar	84		84	
La Punta y La Brava	Otros recubrimientos	178	32	42	32
	Cuerpo de agua	92	3	20	3
	<i>Total tipo punto de validación</i>	270	35	62	35
	Total Sistema Lagunar	305		97	
Peine	Otros recubrimientos	53	6	53	6
	Cuerpo de agua	132	0	123	0
	<i>Total tipo punto de validación</i>	185	6	176	6
	Total Sistema Lagunar	191		182	
Soncor	Otros recubrimientos	87	19	79	19
	Cuerpo de agua	148	2	133	2
	<i>Total tipo punto de validación</i>	235	21	212	21
	Total Sistema Lagunar	256		233	
TOTAL GENERAL		836		596	

* Puntos adicionales a los ejecutados en agosto 2016, dirigidos a zonas donde se determinaron las principales diferencias con la línea de base.

Fuente: Cedrem Consultores.

4.4 Metodología de muestreo y/o medición

El muestreo se llevó a cabo mediante dos técnicas de trabajo en terreno:

- i) **Levantamiento RTK** (del inglés *Real Time Kinematic*) o *navegación cinética satelital en tiempo real*: consistió en el marcaje del tipo de recubrimiento de suelo directamente en terreno para cada punto de muestreo, con receptores GNSS/GPS geodésicos, en coordenadas UTM 19S WGS84.

En la campaña de verano, este muestreo se implementó en los puntos de réplicas estacionales (idem al muestreo de invierno) y en zonas donde se determinó la necesidad de realizar la validación complementaria en los sistemas lagunares, según lo descrito anteriormente, resguardando las condiciones de accesibilidad, seguridad y permisos respectivos en zonas de acceso restringido (ver **ANEXO 9-1**, **ANEXO 9-2**).

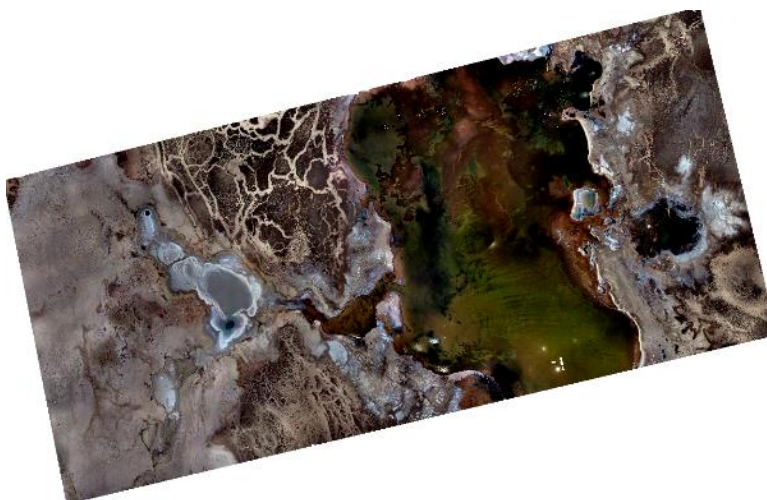
- ii) **Levantamiento fotogramétrico**, en la campaña de diciembre 2016, se utilizó un sistema de dron (o UAV) tipo ala fija en los cuatro sistemas lagunares (ver acápite 4.7).

En terreno la operación del UAV, se dirigió desde una estación de control constituida por un computador con el software *Mission Planner*. El plan de vuelo en terreno estuvo sujeto a la existencia de avifauna residente (en este caso flamencos presentes de los sistemas lagunares) para evitar cualquier perturbación en la especie. También se consideró la accesibilidad, seguridad y permisos respectivos en zonas de acceso restringido.

Además, para georreferenciar el mosaico fotogramétrico, en terreno se midieron puntos de apoyo terrestre con receptores GNSS/GPS geodésicos. Posteriormente, tras el procesamiento post-terreno, el producto resultante de esta actividad fue un mosaico de alta resolución para los cuatro sistemas lagunares (en formato GeoTIFF; Figura N° 4-2).

Posteriormente, en el software GIS Arcmap 10.0 de forma aleatoria se establecieron los puntos de validación sobre cada mosaico UAV y mediante interpretación visual, se realizó la determinación del tipo de recubrimiento de suelo (Cuerpo de agua / Otro recubrimiento). El ANEXO 9-1 y el ANEXO 9-2, 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 9-3.

Figura N° 4-2. Ejemplo de mosaico, obtenido a partir del levantamiento fotogramétrico por sistema de dron ala fija en el sector Soncor.



Fuente: Geosoluciones y Cedrem Consultores; campaña de terreno realizada en diciembre 2016.

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

4.5.1 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 norte que comprenden los sistemas lagunares de Soncor y Aguas de Quelana, y el segundo en el sector sur que corresponde a los sistemas de Peine y La Punta y La Brava (Figura N° 4-3). 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), además de permitir acortar a una semana el plazo de captura de las imágenes para toda el área de estudio, permitiendo que la fecha de captura coincidiera con la validación de terreno.

El satélite Pleiades está constituido de una banda pancromática con resolución de 0,7 m en visual nadir y 4 bandas espectrales (blue - azul, green - verde, red - rojo y near infrared - infrarrojo cercano). La precisión de corrección por ortorectificación puede encontrarse dentro 1m y 10m respectivamente. Las principales características del sensor se describen en la Tabla N° 4-2 y el **ANEXO 9-5** presenta el *metadata* de las imágenes analizadas.

Tabla N° 4-2. Características técnicas del sensor Pleiades-1A.

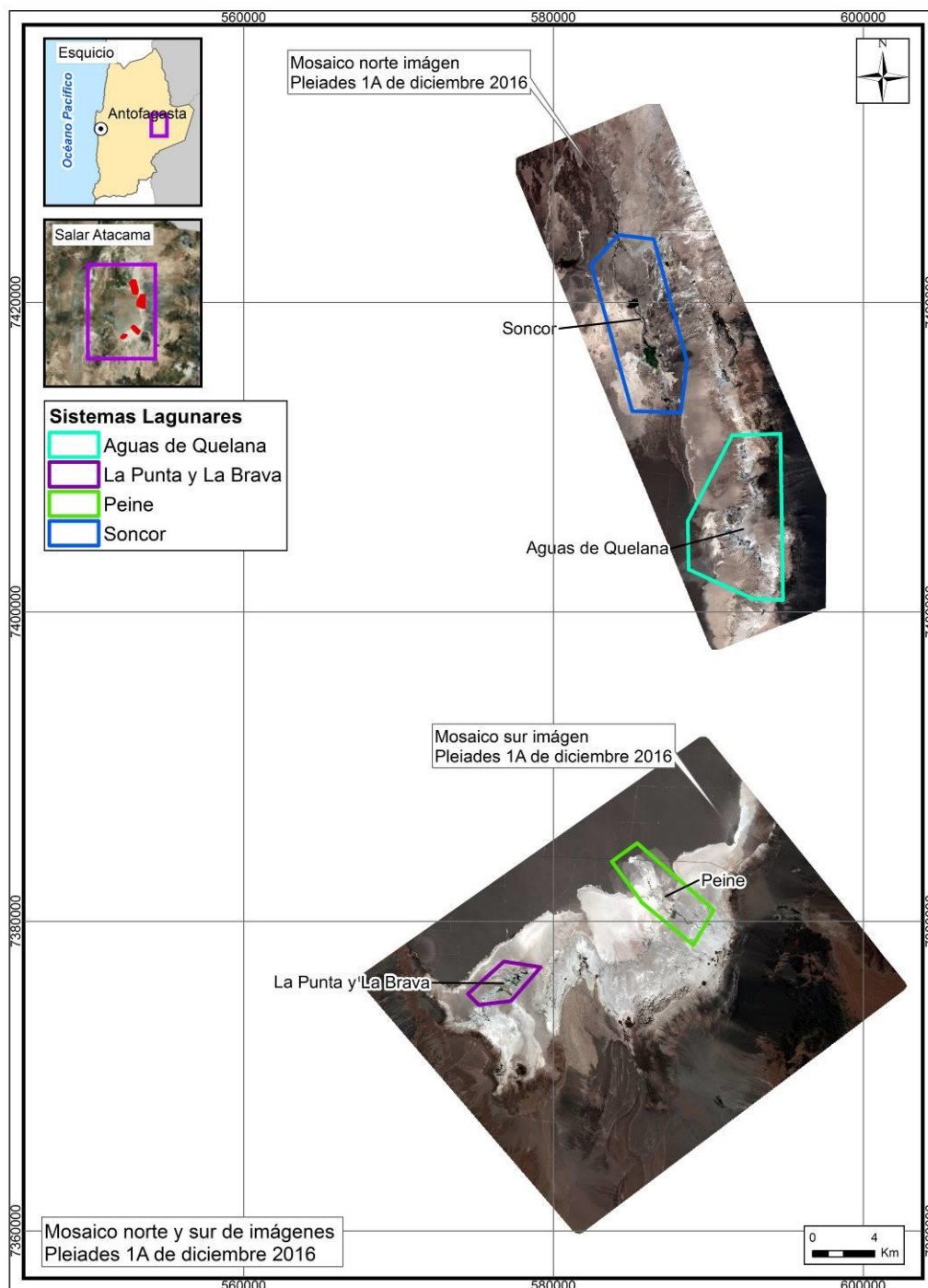
CARACTERÍSTICAS	DETALLE
Órbita	Altitud: 695 km
	Tipo: Tipo sincrónica con el sol
Bandas Sensor	Pancromáticas: 480 - 830 nm
	Multiespectrales

CARACTERÍSTICAS	DETALLE	
	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 2016.

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.

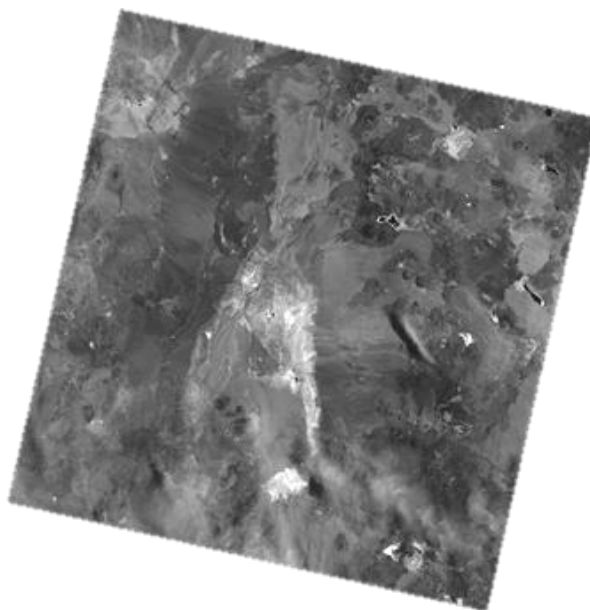


Fuente: Cedrem Consultores en base a imágenes alta resolución Pleiades-1A (diciembre 2016).

4.5.2 Imagen de resolución media – LANDSAT 8

Las imágenes usadas cubren por completo el área de estudio y las fechas de captura corresponden al 16 de diciembre de 2016. 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° 4-3 y el **ANEXO 9-6** presenta la *metadata* de la imagen descargada.

Figura N° 4-4. Ejemplo Imagen Landsat 8 (Banda 5) correspondiente al cuadrante que incluye el área de estudio.



Fuente: United States Geological Survey USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Visitada en diciembre 2016.

Tabla N° 4-3. Características técnicas de las bandas espectrales de la imagen Landsat 8

Banda	Ancho (µm)	Resolución (m)
Band 1 Coastal	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 NIR	0,85 – 0,88	30
Band 6 SWIR1	1,57 – 1,65	30
Band 7 SWIR2	2,11 – 2,29	30
Band 8 Pancromática	0,50 – 0,68	15
Band 9 Cirrus	1,36 – 1,38	30
Band 10 TIRS1	10,6 – 11,19	100
Band 11 TIRS2	11,5 – 12,51	100

Fuente: United States Geological Survey USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Visitada en diciembre 2016.

4.5.3 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 píxeles desde números digitales (ND) a unidades de radiancia espectral absoluta ($W / (m^2 * sr * \mu m)$)⁴. 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 módulo ATCOR (por su sigla en inglés, *Atmospheric & Topographic Correction*) disponible con el software PCI Geomática.

El módulo de corrección atmosférica ATCOR 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 atmosféricas de la reflectancia del suelo y las correcciones atmosféricas de la temperatura superficial.

El algoritmo ATCOR trabaja con una base de datos de funciones de corrección atmosféricas almacenados en tablas de búsqueda, para diferentes perfiles de altitud de presión, la humedad, y el tipo de aerosol. El método calcula la reflectancia del suelo para cada píxel, en cada banda espectral; posteriormente se puede utilizar para análisis de índices espectrales o para comparar los valores de reflectancia entre imágenes satelitales.

Es importante mencionar que el método ATCOR en comparación al método IARR (por su sigla en inglés, 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 ATCOR (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

⁴ Dónde: W: Watts; m²: metro cuadrado; sr: estereorradián; μm : micrómetro.

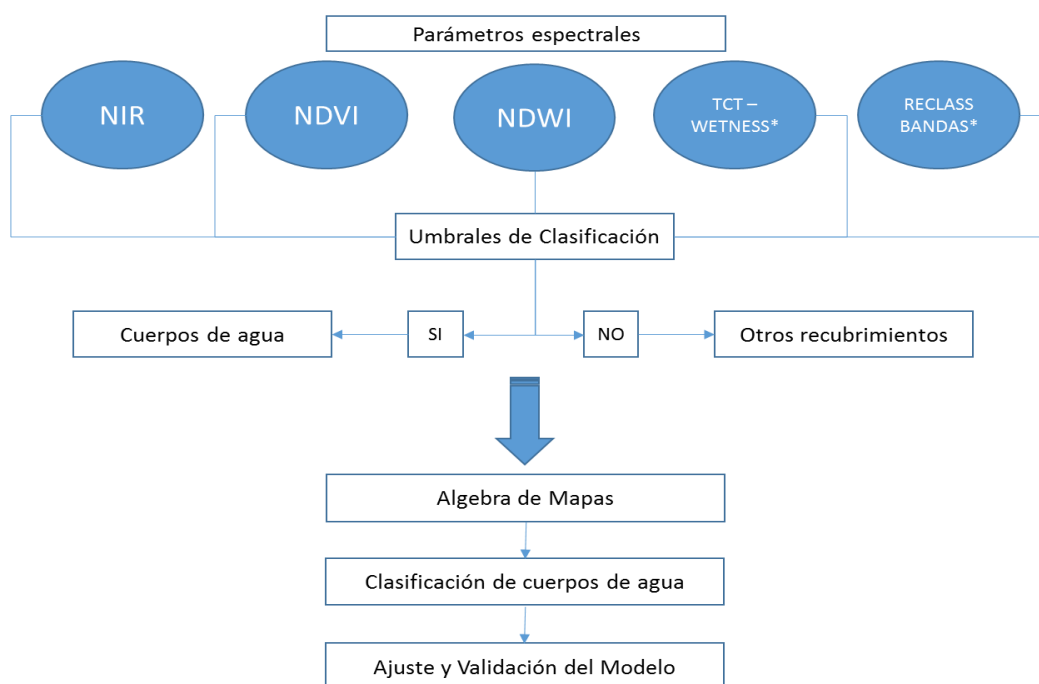
modelo actual (el **ANEXO 9-4** detalla los ajustes metodológicos aplicados y sus implicancias en la estimación de los cuerpos de agua).

Seguidamente, 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. 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 Figura N° 4-3).

4.5.4 Descripción del Modelo de Clasificación Supervisada de cuerpos de agua

El modelo usado durante este análisis, se desarrolló en base a la metodología “Modificada del 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 mediante la validación con los datos de terreno (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 4.5.5 describe en detalle cada uno de estos parámetros.

Comparativamente entre la metodología de línea de base y la actual, cabe destacar que la presente, incorporó 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, afectan la reflectancia del suelo en distintos grados y puede conducir a errores significativos durante interpretaciones espectrales (Wang *et al.*, 2012). El **ANEXO 9-4** detalla los ajustes metodológicos aplicados en relación a la línea de base y las posibles implicancias en la estimación de los cuerpos de agua.

4.5.5 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 realizó la reclasificación de esta Banda, en valores por debajo del percentil 20% en las capturas espectrales de Agosto 2016, y valores por debajo del percentil 30% en las capturas espectrales de Diciembre 2016, para la categorización de cuerpos de agua en las áreas de estudio (ver acápite 4.5.6). El cálculo de este parámetro se realizó tanto en las imágenes Landsat 8 como en las imágenes de alta resolución Pleiades-1A.

d. Reclasificación de bandas espectrales

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**). Dónde las bandas corresponden a: B1 azul, B2 verde, B3 rojo y B4 infrarrojo cercano.

e. Transformación “Tasseled Cap”

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

En el caso de la componente 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).

4.5.6 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 y para cada clase de imagen satelital.

La definición de cada umbral se realizó mediante inspección visual (clasificación supervisada), controlada por el conocimiento de las características de los objetos a catalogar y de su respuesta espectral. 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), en contraste con el patrón espacial obtenido en los monitoreos de la fase de construcción de la primera fase de operación realizados para esta componente. Complementariamente, el proceso estuvo guiado por los datos de validación tomados en terreno en las campañas de agosto y diciembre de 2016 (RWL, 2016a). Los umbrales obtenidos se presentan en la Tabla N° 4-4. Cabe destacar que las variaciones de estos valores respecto a la línea de base, son atribuibles al cambio del tipo de imágenes satelitales usadas y a las diferencias en el procesamiento de estas, según se detallan en el **ANEXO 9-4**.

Tabla N° 4-4. Valores de los umbrales de clasificación de los parámetros espectrales usados, según el tipo de imagen satelital usada (Pleiades 1A y Landsat 8) para la delimitación de cuerpos de agua en los sistemas lagunares del Salar de Atacama en agosto y diciembre 2016.

		SISTEMA LAGUNAR			
		SONCOR	PEINE	QUELANA	LA PUNTA Y LA BRAVA
AGOSTO 2016					
Parámetros LANDSAT 8	NDWI	> 0	R 2/20 >= -0,125897	R5/13 >= -0,113083	P85 >= -0,121345
	NDVI	< 0	P10 <= 0,04857	NB 1/2 <= 0,03169	P10 <= 0,041655
	NIR - B5	P15 <= 0,268896	P15 <= 0,341189	P20 <= 0,283146	R6/15 <= 0,252789
	WETNESS	P90 >= 0,03681	R 13/20 >= 0,04195	P70 >= 0,074343	R11/15 >= 0,043112
Parámetros AR PLEIADES	NDWI	NB 3/9 >= -0,104365	NB 4/9 >= -0,105765	R11/25 >= -0,075114	>0
	NDVI	< 0	P5 <= 0,044516	R5/10 <= 0,035248	NB13/20 <= 0,032368
	NIR - B4	P5 <= 0,15028	NB 2/9 <= 0,341189	NO APORTA	P5 <= 0,16000508
	(B1<B2) Y (B3> B4)	INCORPORADO	INCORPORADO	INCORPORADO	INCORPORADO
DICIEMBRE 2016					
Parámetros LANDSAT 8	NDWI	P95 >= -0,099486	R2/20 <= -0,095224	R10/17 >= -0,108596	P90 >= -0,113313
	NDVI	P10 <= 0,048127	P5 <= 0,031596	NB5/32 <= 0,039645	P10 <= 0,045167
	NIR - B5	P15 <= 0,29516	P30 <= 0,218006	R12/32 <= 0,289409	R9/15 <= 0,376538
	WETNESS	P85 >= -0,050163	R11/20 >= -0,035562	>0	R12/15 >= -0,062625
Parámetros AR PLEIADES	NDWI	NB 3/9 >= -0,115191	P80 >= -0,118218	NB18/32 >= -0,099164	R 5/15 >= -0,045638
	NDVI	P10 <= 0,043535	P5 <= 0,047516	R16/32 <= 0,042796	R14/20 <= 0,041298
	NIR - B4	P5 <= 28,960226	NB 2/9 <= 0,393334	R12/32 <= 0,36928723	P5 <= 29,725685
	(B1<B2) Y (B3> B4)	NO INCORPORADO	INCORPORADO	INCORPORADO	NO INCORPORADO

Dónde: R: Intervalo equivalente (Equal Interval), donde todos los valores se subdividen en rangos del mismo tamaño; **NB**:

Quiebres naturales (Natural breaks), basado en las agrupaciones naturales inherentes a la distribución de los datos;

P: Percentiles (Quantile).

Fuente: Cedrem Consultores.

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 GIS ArcGIS 10.0.

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

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

Seguidamente, se procedió con la validación del modelo de clasificación la cual se realizó 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 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 solo 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 (Chuvienco, 2006).

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

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

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

Con los datos tomados en terreno y la clasificación finalizada por sistema lagunar, se procedió a evaluar su ajuste mediante la utilización de la Matriz de Confusión y el Índice de *Kappa*, con la finalidad de determinar la precisión obtenida.

4.5.7 Depuración cartográfica de cuerpos de agua

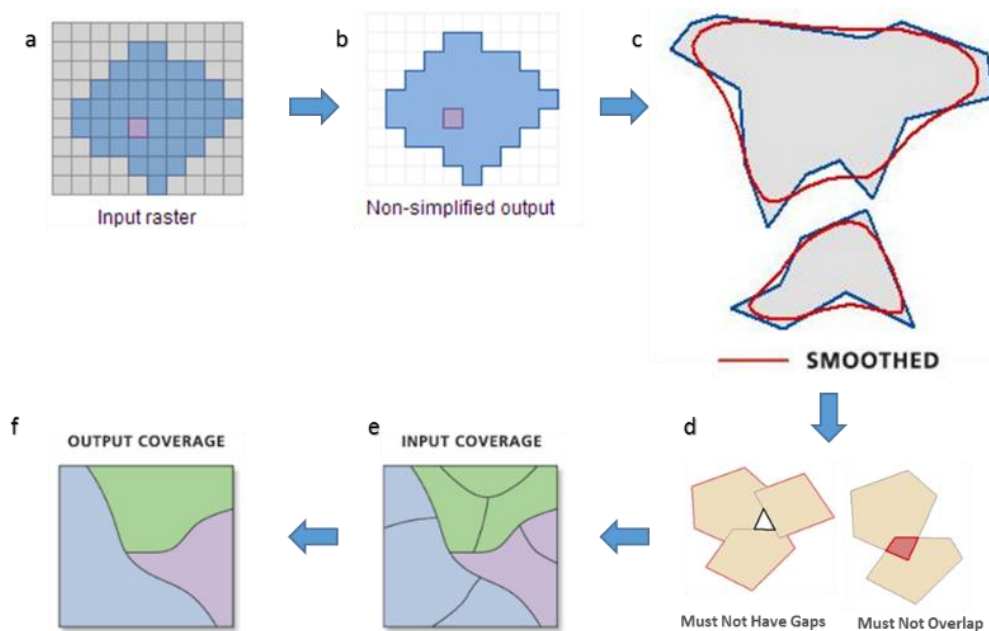
Posterior a obtener las coberturas de clasificación de los cuerpos de agua según el tipo de imagen satelital usada (Pleiades-1A y Landsat 8) y por sistema lagunar, se procedió con la depuración de las coberturas. Este proceso consistió primero en la transformación de los datos desde formato raster a 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). Durante el suavizado se producen errores topológicos, como cruces de contorno entre polígonos, que fueron corregidos sustrayendo valores y/o creando nuevas entidades en los espacios sin información.

Adicionalmente, se realizó una depuración final en los *shapes*, la cual buscó 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 de mayor superficie, siguiendo el patrón espacial de los registros de línea de base (Adenda 5 RWL, 2015) y de los monitoreos de invierno y verano 2016. Para este proceso, se utilizaron los mosaicos de alta resolución (0,06m), obtenidos del vuelo del dron.

El resultado de estas operaciones originó una clasificación binaria (cuerpos de agua / otros recubrimientos), que fueron fusionados por parámetros con igual codificación, y ajustados a los polígonos que delimitan las áreas de estudio. El resultado final correspondió 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.

4.5.8 Ajuste a cuerpos de agua del primer monitoreo por validación complementaria

Con el fin de robustecer el proceso de delimitación de las lagunas, durante el presente estudio se realizó un ajuste a las coberturas de cuerpos de agua obtenidas en el primer monitoreo de invierno; esto a partir de los registros de la validación complementaria realizada en la campaña de diciembre 2016 -en zonas donde se determinaron las principales diferencias con las coberturas de línea de base en el primer monitoreo - (Ver en sección 4.3 los detalles de este muestreo).

Este ajuste consistió en la revisión y depuración en los límites de los cuerpos de agua, prevaleciendo para la clasificación final del recubrimiento de suelo, el registro de validación de terreno por sobre el resultado del modelo (invierno 2016).

Para el ajuste en la delimitación de las coberturas, se realizó un proceso de interpretación visual (fotointerpretación) con las imágenes disponibles, correspondientes a las satelitales (de agosto y diciembre, 2016) y los mosaicos de alta resolución capturados con los vuelos del dron. El proceso de fotointerpretación, consistió inicialmente en la comprensión de la respuesta espectral del recubrimiento de suelo en las imágenes, según registros de validación de terreno; seguido por la confirmación / eliminación de los cuerpos de agua según validación o bien, el ajuste de los límites de las lagunas según el análisis espectral ejecutado en principio.

4.6 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 dos tipologías:

- *Comparación con registros históricos de línea de base*: se realizó entre el resultado de las superficies de lagunas registradas en el monitoreo de diciembre 2016, 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 actual desde las imágenes de alta resolución Pleiades-1A y Landsat 8.

Cabe destacar que el actual monitoreo, describe los cuerpos de agua en condiciones de operación del proyecto, mientras que el primer monitoreo de invierno (agosto 2016) se ejecutó durante la etapa de construcción, previo a operaciones. En adelante estos deberán ser comparados con los registros que se obtengan en la etapa de seguimiento, durante operación (establecido con frecuencia semestral).

4.7 Materiales y equipos utilizados

Los equipos utilizados en la campaña de diciembre 2016 para el levantamiento fotogramétrico de los sistemas lagunares, corresponden a:

- *Sistema de dron (o UAV) tipo ala fija*: El equipo utilizado correspondió a una aeronave de referencia E382, cuyas dimensiones son 1.720 mm x 1.180 mm y un peso de 2.267 g. La aeronave portó una cámara fotográfica Canon Powershot X230.
- *Estación de control*: constituida por computador portátil con software Mission Planner; conectado mediante radio modem para recepción telemétrica de datos, en tiempo real. (Figura N° 4-7)

También fueron utilizados receptores geodésicos GNSS/GPS, para levantamiento RTK (del inglés Real Time Kinematic) o navegación cinética satelital en tiempo real, en todos los sistemas lagunares.

Figura N° 4-7. Equipos utilizados en levantamiento fotogramétrico: Dron de ala fija o UAV (Unmanned Aerial Vehicle, izquierda) y estación de control de vuelo (derecha)



Fuente: Geosoluciones

4.8 Fechas de medición

La imagen satelital de resolución media, Landsat 8, fue capturada el 16 de diciembre de 2016; mientras que las imágenes de alta resolución, Pleiades 1A, fueron capturadas el 11 de diciembre de 2016⁵. Las fechas y datos de las imágenes utilizadas en este análisis se presentan en el ANEXO 9-5 y ANEXO 9-6.

5 RESULTADOS

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

La clasificación supervisada de cuerpos de agua se llevó a cabo para imágenes Pleiades-1A y Landsat 8 en los sistemas lagunares Soncor, Peine, Aguas de Quelana, y La Punta y La Brava, para el periodo de diciembre de 2016. La validación del ajuste de las coberturas determinadas, en relación a los datos de terreno recabados, se realizó mediante el índice *Kappa*. Este índice tuvo una variación entre 0,82 a 0,91 para imágenes de alta resolución Pleiades-1A (Tabla N° 5-1) y desde 0,62 a 0,83 para imágenes de resolución media Landsat 8 (Tabla N° 5-2). Estos valores dan cuenta de un ajuste entre muy confiable de las coberturas obtenidas.

⁵ De forma paralela, la colección de datos en terreno se llevó a cabo en una campaña ejecutada los días 11 al 18 de diciembre de 2016.

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.

Sistema Lagunar	Recubrimiento del modelo de clasificación	Número de Puntos de validación de terreno Total			** Exactitud global del mapa (%)	****Error de comisión (%)
		Cuerpos de agua	Otros Recubrimientos	Total		
Aguas de Quelana	Cuerpos de agua	24*	3	27	88,9	11,1
	Otros Recubrimientos	2	55*	57	96,5	3,5
	Total	26	58	84	-	-
	Exactitud de Campo (%)	92,3	94,8	-	-	-
	***Error omisión (%)	7,7	5,2	-	-	Índice Kappa: 0,86
La Punta y La Brava	Cuerpos de agua	82*	13	95	86,3	13,7
	Otros Recubrimientos	10	200*	210	95,2	4,8
	Total	92	213	305	-	-
	Exactitud de Campo (%)	89,1	93,9	-	-	-
	***Error omisión (%)	10,9	6,1	-	-	Índice Kappa: 0,82
Peine	Cuerpos de agua	128*	4	132	97,0	3,0
	Otros Recubrimientos	3	56*	59	94,9	5,1
	Total	131	60	191	-	-
	Exactitud de Campo (%)	97,7	93,3	-	-	-
	**Error omisión (%)	2,3	6,7	-	-	Índice Kappa: 0,91
Soncor	Cuerpos de agua	139*	11	150	92,7	7,3
	Otros Recubrimientos	1	105*	106	99,1	0,9
	Total	140	116	256	-	-
	Exactitud de Campo (%)	99,3	90,5	-	-	-
	***Error omisión (%)	0,7	9,5	-	-	Índice Kappa: 0,90

Dónde: * número de puntos verificados en terreno 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 (Chuvieco, 2006). Fuente: Cedrem Consultores.

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.

Sistema Lagunar	Recubrimiento del modelo de clasificación	Número de Puntos de validación de terreno Total			** Exactitud global del mapa (%)	****Error de comisión (%)
		Cuerpos de agua	Otros Recubrimientos	Total		
Aguas de Quelana	Cuerpos de agua	19*	8	27	70,4	29,6
	Otros Recubrimientos	1	56*	57	98,2	1,8
	Total	20	64	84	-	-
	Exactitud de Campo (%)	95,0	87,5	-	-	-
	***Error omisión (%)	5,0	12,5	-	-	Índice Kappa: 0,74
La Punta y La Brava	Cuerpos de agua	16*	7	23	69,6	30,4
	Otros Recubrimientos	6	68*	74	91,9	8,1
	Total	22	75	97	-	-
	Exactitud de Campo (%)	72,7	90,7	-	-	-
	***Error omisión (%)	27,3	9,3	-	-	Índice Kappa: 0,62
Peine	Cuerpos de agua	119*	4	123	96,7	3,3
	Otros Recubrimientos	9	50*	59	84,7	15,3
	Total	128	54	182	-	-
	Exactitud de Campo (%)	93,0	92,6	-	-	-
	**Error omisión (%)	7,0	7,4	-	-	Índice Kappa: 0,83
Soncor	Cuerpos de agua	118*	17	143	91,6	8,4
	Otros Recubrimientos	9	89*	69	87,0	13,0
	Total	127	106	212	-	-
	Exactitud de Campo (%)	92,9	84,0	-	-	-
	***Error omisión (%)	7,1	16,0	-	-	Índice Kappa: 0,77

Dónde: * número de puntos verificados en terreno 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 (Chuvieco, 2006). Fuente: Cedrem Consultores.

En las coberturas de invierno (agosto, 2016), el ajuste producto de la validación complementaria realizada durante el actual monitoreo, conllevó a un robustecimiento del modelo -evaluado mediante un ascenso de los índices *Kappa*- y a un descenso de la mayoría de las superficies de cuerpos de agua estimadas previo a la validación. Los valores del *Kappa*, aumentaron en un rango entre 1% (Peine) y 31% (La Punta y La Brava) para imágenes de alta resolución Pleiades-1A, y desde 1% (Peine) a 32% (La Punta y La Brava) para Landsat 8. En cuanto a las superficies de lagunas, el rango de variación porcentual en sectores con descenso fue desde 7% (Peine) a 17% (La Punta y La Brava) para Pleiades-1A y entre 7% a 19% para Landsat 8 (Tabla N° 5-3). El **ANEXO 9-7** y **ANEXO 9-8**, muestran los ajustes obtenidos en las coberturas de cuerpos de agua por sistema lagunar.

Tabla N° 5-3. Variación en coberturas de invierno 2016 por muestreos complementarios realizados durante el actual monitoreo en los sistemas lagunares

Sistema Lagunar	Índice Kappa						Superficie cuerpos de agua (Ha)					
	PLEIADES 1A AR			LANDSAT 8 MR			PLEIADES 1A AR			LANDSAT 8 MR		
	Previo a VC	Ajuste con VC	Dif. (%)	Previo a VC	Ajuste con VC	Dif. (%)	Previo a VC	Ajuste con VC	Dif. (%)	Previo a VC	Ajuste con VC	Dif. (%)
Aguas de Quelana	0,72	0,87	21%	0,72	0,77	7%	29,2	33,4	14%	58	58,2	0%
La Punta y La Brava	0,45	0,59	31%	0,47	0,62	32%	57,1	47,4	-17%	76,9	62,6	-19%
Peine	0,89	0,9	1%	0,83	0,84	1%	79,3	74,1	-7%	123,8	114,7	-7%
Soncor	0,89	0,91	2%	0,78	0,8	3%	280,3	258,9	-8%	296,8	269,9	-9%

Dónde: **VC**: Validación complementaria; **Dif. (%)**: Diferencias porcentual entre los parámetros previo y posterior al ajuste.

Fuente: Cedrem Consultores, en base a validación complementaria realizada en campaña de terreno de diciembre (2016).

Particularmente en el sector Aguas de Quelana, se determinó un aumento de las superficies de cuerpos de agua, lo cual se presentó producto de la validación en terreno de cuerpos de agua someros los cuales se localizan sobre un recubrimiento vegetal y/o salino (Fotografía N° 5-1 a y b). En el modelo de clasificación, estos recubrimientos señalados predominan en la respuesta espectral de los parámetros, por lo que fueron inicialmente clasificados como “otros recubrimientos”. El **ANEXO 9-7** muestra las zonas agregadas como cuerpos de agua tras validación.

Las mayores variaciones obtenidas en el sector La Punta y la Brava, se debe a la validación de “*otros recubrimientos*” en zonas que previamente fueron delimitadas como cuerpos de agua. Estas corresponden a superficies húmedas con afloramientos de agua someros y desarrollo visible de tapete microbiano (Fotografía N° 5-1 c y d). Debido a la alta humedad superficial y sub-superficial en estas zonas, los parámetros del modelo indicaron inicialmente una respuesta espectral similar a “*cuerpos de agua*”. El **ANEXO 9-7** muestra las zonas ajustadas a “*otros recubrimientos*” tras validación.

Fotografía N° 5-1. Principales variaciones en el tipo de recubrimiento de suelo obtenidas durante la validación complementaria: cuerpos de agua verificados sobre coberturas salinas (a) o con vegetación (b) en el sector Quelana; (c) y (d) representan *otros recubrimientos* –no cuerpos de agua- rectificados sobre zonas de napas someras y con desarrollo de tapete microbiano en el sector La Punta y La Brava.



Fuente: Cedrem Consultores en campaña de diciembre 2016

5.2 Superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar

En términos generales, la Tabla N° 5-4 se presentan las superficies de los cuerpos de agua que fueron determinadas a partir del modelo de clasificación supervisada. Al contrastar los resultados anuales (2016) con el promedio histórico según registros de línea de base (Adenda 5 RWL, 2015) por sistema lagunar, la mayor cobertura lagunar se determinó en el sector Soncor con 257,2 ha desde la imagen Pleiades 1A y 251,9 ha desde Landsat 8; en contraparte, Aguas de Quelana presentó la menor superficie de 26,1 ha con Pleiades 1A y 49,9 ha con Landsat 8.

A continuación, 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° 5-4. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales (Pleiades 1A y Landsat 8) y datos obtenidos en el monitoreo 2016 (invierno y verano), respecto de los registros de línea de base (Adenda 5 RWL, 2015).

Sistema Lagunar	Superficies (ha) de registros históricos (Adenda 5 RWL, 2015)			Superficies (ha) Pleiades 1A de alta resolución			Superficies (ha) Landsat 8 de media resolución		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Invierno	Verano	Promedio anual	Invierno	Verano	Promedio anual
Aguas de Quelana	22,2	33,1	11,3	33,4	18,8	26,1	58,2	41,6	49,9
La Punta y La Brava	33,82	35	31,6	47,4	40,9	44,2	62,6	55	58,8
Peine	64,8	73,6	48,9	74,1	50,2	62,2	114,7	110,3	112,5
Soncor	217,4	234,2	192,4	258,9	255,6	257,2	269,9	233,8	251,9

Fuente: Cedrem Consultores

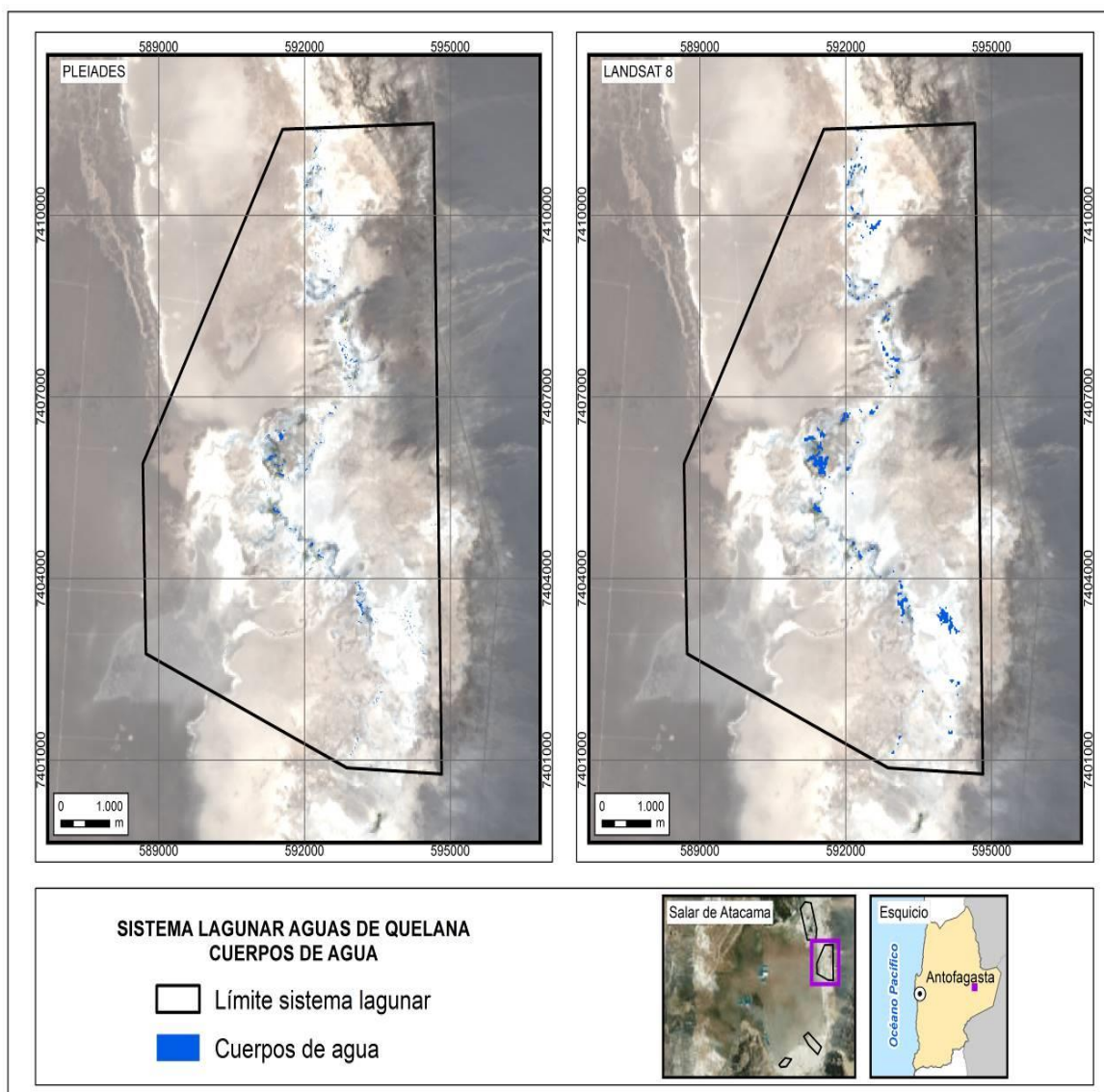
5.2.1 Aguas de Quelana

a. Comparación con registros históricos de línea de base

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 diciembre 2016, abarca una superficie de 18,8 ha (Figura N° 5-1 y Figura N° 5-2). La comparación con los registros históricos de línea de base, estimados desde imágenes de alta resolución (Adenda 5 RWL, 2015), indica que la cobertura actual presenta un incremento de 7,5 ha (40,0%) respecto del mínimo histórico (11,3 ha), el cual fue determinado usando únicamente imágenes del periodo marzo-abril, mientras que el área determinada en el presente estudio corresponde a una condición de “verano” (diciembre). En tanto, el valor del actual monitoreo es inferior en 14,3 ha (75,9%) respecto del máximo histórico (33,1 ha). La Figura N° 5-2 muestra la comparación gráfica y numérica de las superficies con los registros históricos en el sector.

La diferencia entre la superficie estimada en la presente campaña (fase de operación) respecto a la situación de línea base, se puede atribuir a varios factores, entre los que se cuentan: i) variabilidad estacional intranual ii) variabilidad estacional interanual; iii) robustecimiento de la metodología del procesamiento de las imágenes (detalles en Tabla N° 5-3 y sección 6.2).

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



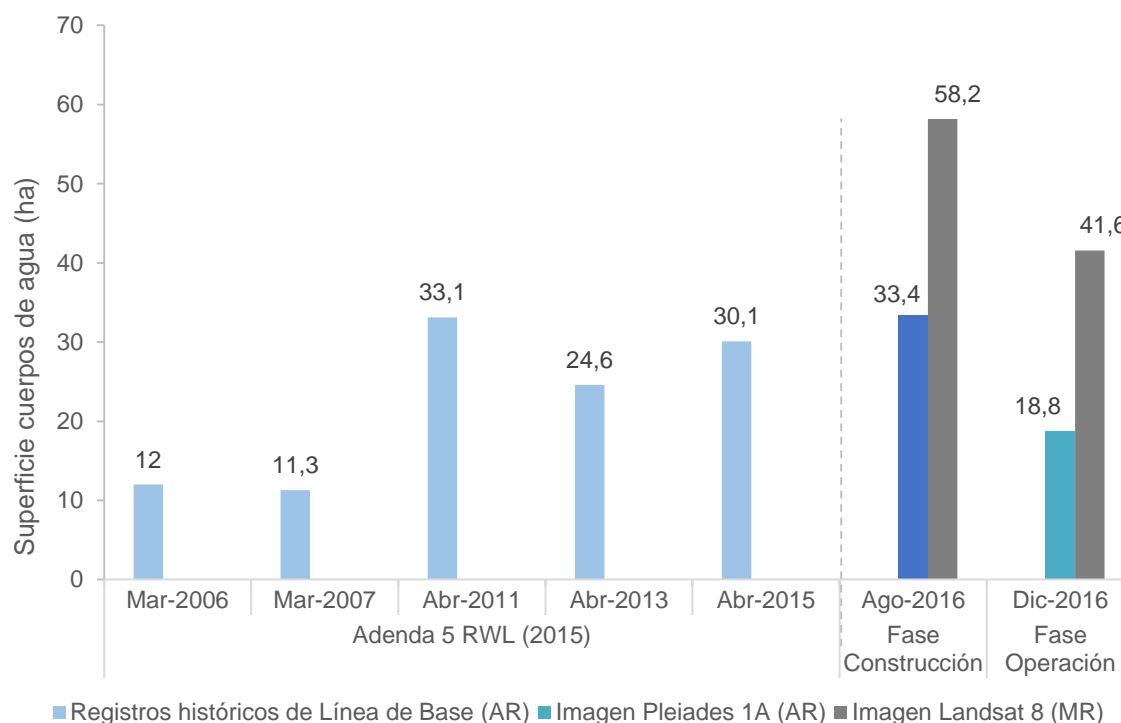
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016.

b. Comparación entre imágenes Pleiades y Landsat

En el sistema lagunar Aguas de Quelana, desde las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 41,6 ha en diciembre de 2016. La diferencia con el registro desde imágenes de alta resolución Pleiades 1A, representa un 54,7%, o bien, 22,8 ha más en la superficie desde Landsat 8. La Figura N° 5-1 y la Figura N° 5-2, muestran respectivamente la representación espacial y la comparación de las superficies de los cuerpos de agua con los registros históricos en la zona.

El aumento de la superficie estimada por Landsat 8 es esperable, y se debe principalmente a la diferencia de resolución entre ambas imágenes, así como también a la incorporación de zonas de transición y enlace entre los cuerpos de agua que presentaban nula o parcial delimitación en los resultados con imágenes de alta resolución. Sin embargo, las imágenes presentan índices *Kappa* de 0,86, en Pleiades 1A, y de 0,74 en Landsat 8; lo que señala que, si bien la resolución de las imágenes Landsat puede sobrestimar los cuerpos de agua, los puntos de validación en terreno confirman que la superficie mayor determinada mediante Landsat, corresponde a la fisonomía de la zona.

Figura N° 5-2. Registros históricos y superficie actual de los cuerpos de agua, sistema lagunar Aguas de Quelana.



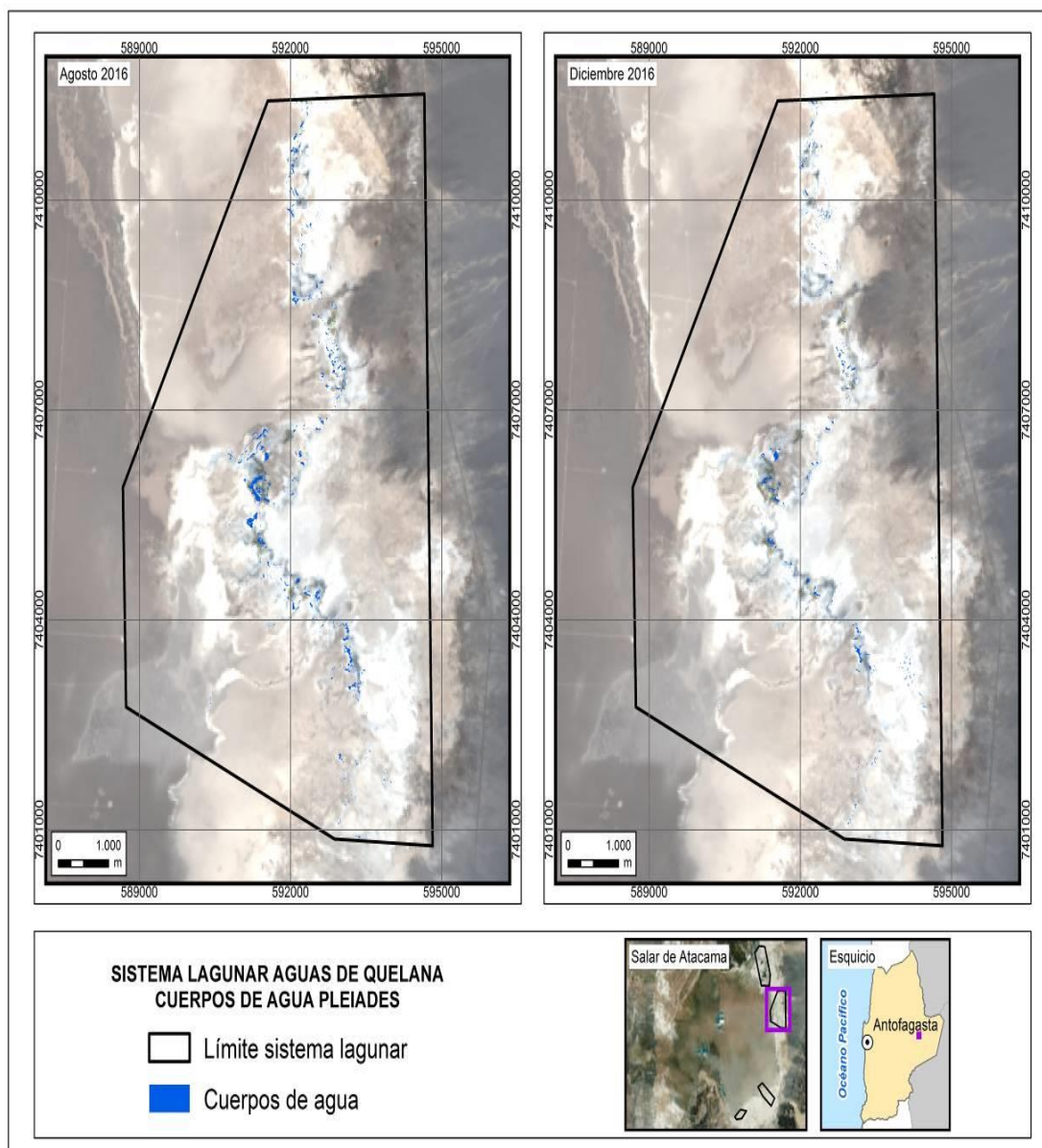
■ Registros históricos de Línea de Base (AR) ■ Imagen Pleiades 1A (AR) ■ Imagen Landsat 8 (MR)

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.

c. Comparación entre monitoreos, construcción versus operación

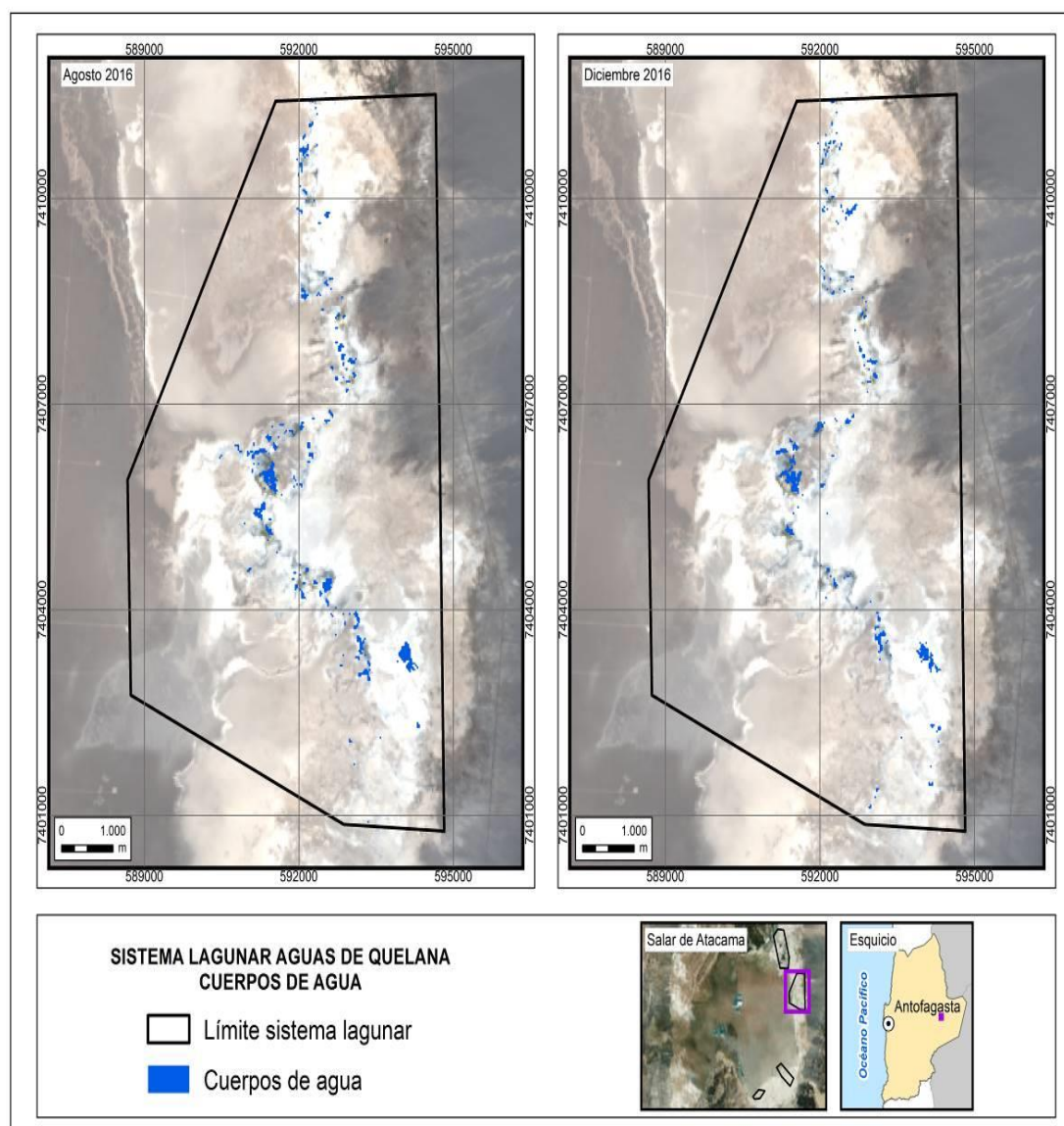
En el monitoreo de verano, la superficie de coberturas lagunares disminuyó en 14,6 ha, en imágenes Pleiades 1A, y en 16,6 ha, en imágenes Landsat 8, en comparación con las superficies lagunares de invierno. Esta disminución se presenta en un contexto característico del comportamiento estacional, dado por el efecto de evaporación y por el aumento de flujos subsuperficiales y subterráneos en época invernal, que tiene efectos importantes sobre la fisonomía particular de este sector, que se presenta como un sistema de pequeñas lagunas y zonas de inundación estacional de carácter no permanentes (DGA, 2014; Cornellà, O. et al, 2009). Las Figura N° 5-3 y Figura N° 5-4 muestra las diferencias de las superficies lagunares entre monitoreos.

Figura N° 5-3. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Pleiades 1A.



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

Figura N° 5-4. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Aguas de Quelana, a partir de imágenes Landsat 8.



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

5.2.2 La Punta y La Brava

a. Comparación con registros históricos de línea de base

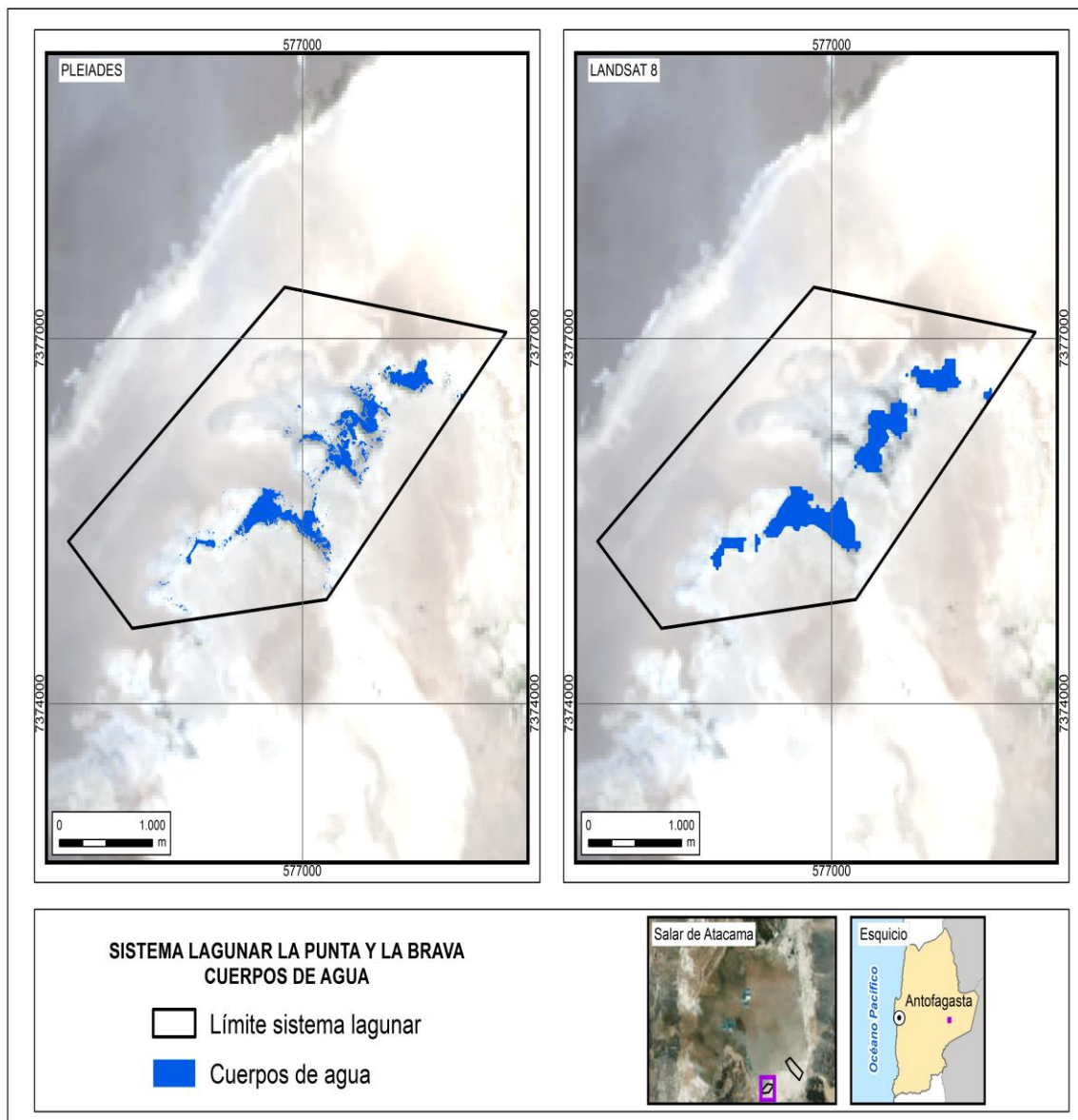
En el sistema lagunar La Punta y La Brava, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades-1A en diciembre 2016, abarca una superficie de 40,9 ha (Figura N° 5-5). La comparación con los registros de línea de base, estimados desde este mismo tipo de imágenes satelitales (Adenda 5 RWL, 2015), indica que la cobertura actual aumento en 5,9 ha (16,8%) respecto al máximo histórico (35,0 ha); por otra parte, existe un aumento de 9,3

ha (29,4%) con respecto al mínimo histórico (31,6 ha). La Figura N° 5-6 muestra la comparación gráfica y numérica de las superficies con los registros históricos en la zona.

En este sector dentro del área de estudio, se estimó el menor ajuste en el modelo de clasificación de agosto, con un índice *Kappa* de 0,47; mientras que posterior al ajuste en base a la validación complementaria, se logró un índice *Kappa* de 82,3%, (detalles en sección 5.1). El aumento en la superficie estimada en la presente campaña (verano) respecto a la situación de línea base, se puede atribuir a varios factores, entre los que se cuentan: i) variabilidad estacional intranual ii) variabilidad estacional interanual; iii) robustecimiento de la metodología del procesamiento de las imágenes (detalles en sección 6.2).

En particular, la incorporación de puntos de validación complementaria de terreno durante diciembre, disminuyó la incertidumbre particularmente en la zona noroeste, ya que en agosto los parámetros espectrales en el modelo de clasificación propuesto, provocaron una mayor sensibilidad en la detección de cuerpos de agua someros, los que estarían sujetos a una alta variabilidad estacional. Este comportamiento, se atribuye también a la naturaleza del sector, donde no existe una delimitación marcada de los cuerpos de agua, y en general se presentan zonas de ecotono con gradiente de humedad y vegetación acuática, las cuales conducen a que la respuesta de los parámetros espectrales – principalmente el NDVI y el álgebra de bandas espectrales en Pleiades 1A – indiquen un recubrimiento de áreas denudadas o vegetación, no obstante la validación en terreno, respaldó la existencia e inexistencia de lagunas.

Figura N° 5-5. 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.



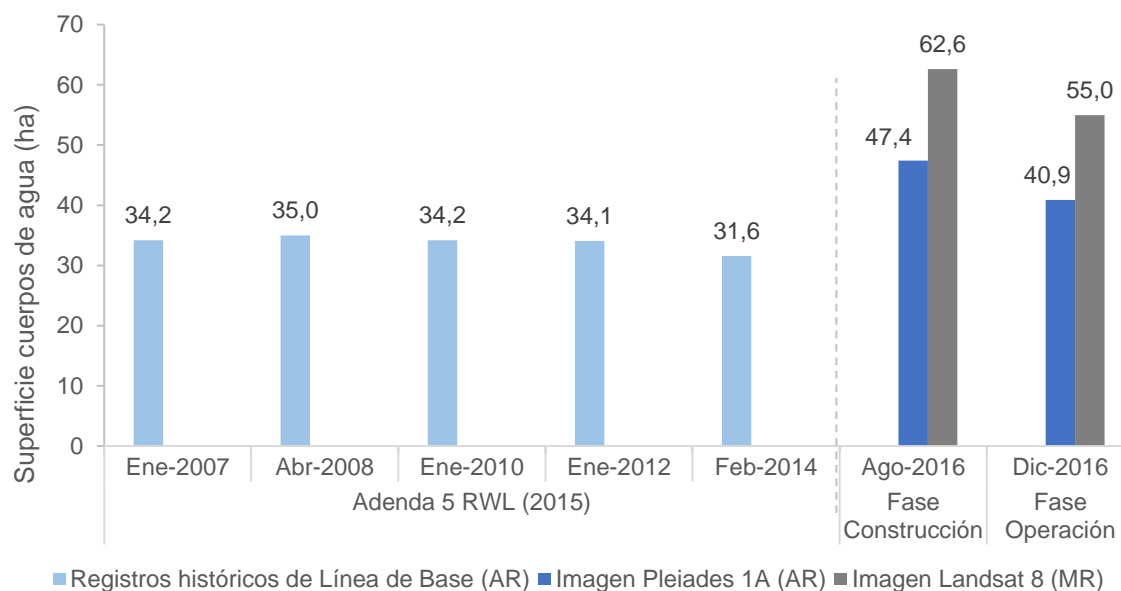
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016.

b. Comparación entre imágenes Pleiades y Landsat

En este sistema lagunar, desde las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 55 ha en diciembre de 2016. La diferencia con el registro desde imágenes de alta resolución Pleiades-1A, representa un 25,7% (14,1 ha) más en la superficie desde Landsat 8. La Figura N° 5-5 y Figura N° 5-6, muestran respectivamente la representación espacial y la comparación de las superficies de los cuerpos de agua con los registros históricos en la zona.

La diferencia determinada entre el tipo de imágenes, es esperable y atribuible a diferencias en su resolución espacial, lo cual condujo a una estimación mayor de la superficie Landsat 8 (Resolución media de 30 m) en todos los casos de estudio (ver detalles en sección 5.1). No obstante, en este sector se registró la menor variación de superficie entre imágenes.

Figura N° 5-6. Registros históricos y superficie actual de los cuerpos de agua, sistema lagunar La Punta y La Brava.



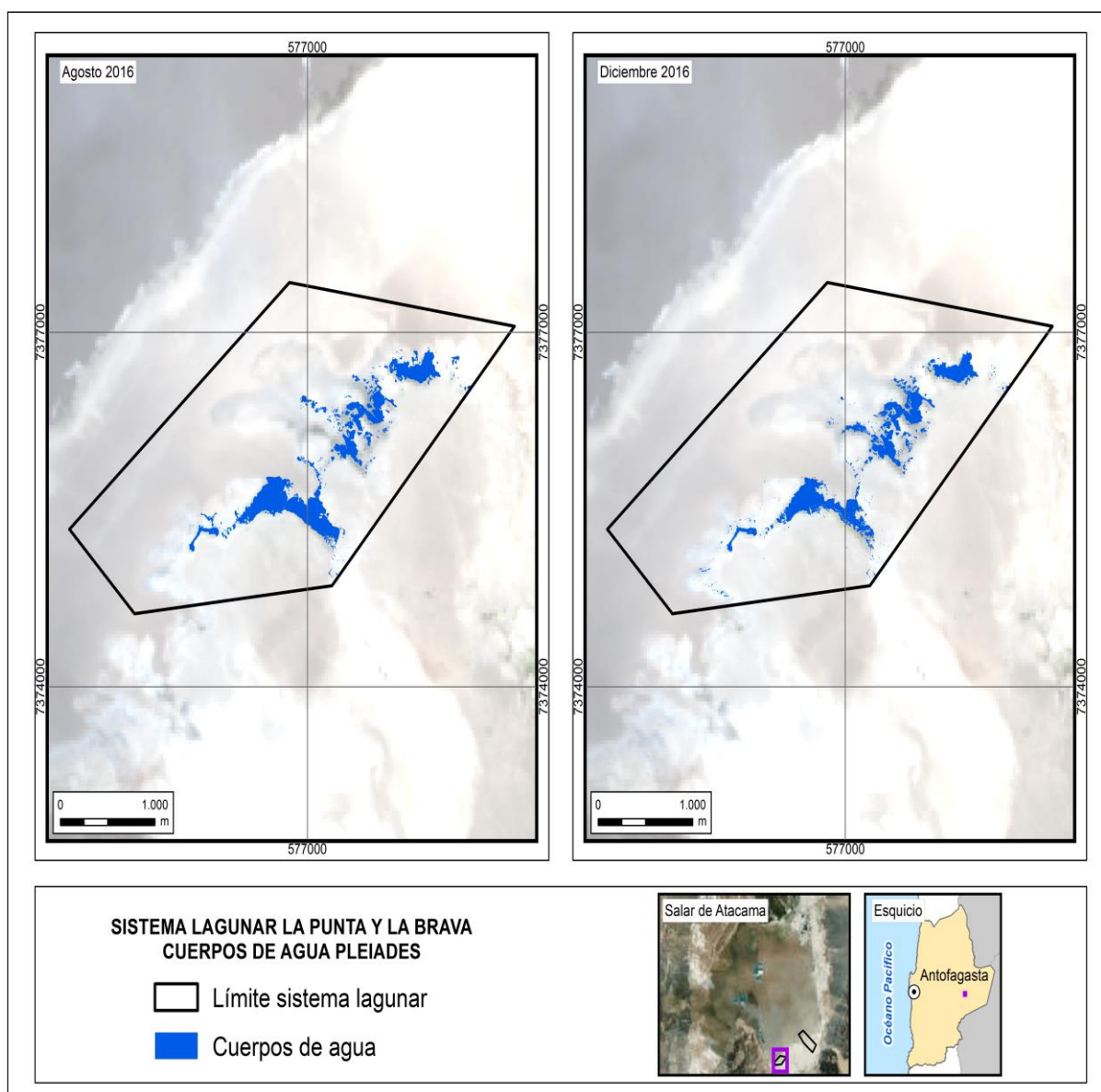
Dónde; **MR**: Imagen de Mediana Resolución (pixel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (pixel menor a 4m).

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

c. Comparación entre monitoreos, construcción versus operación

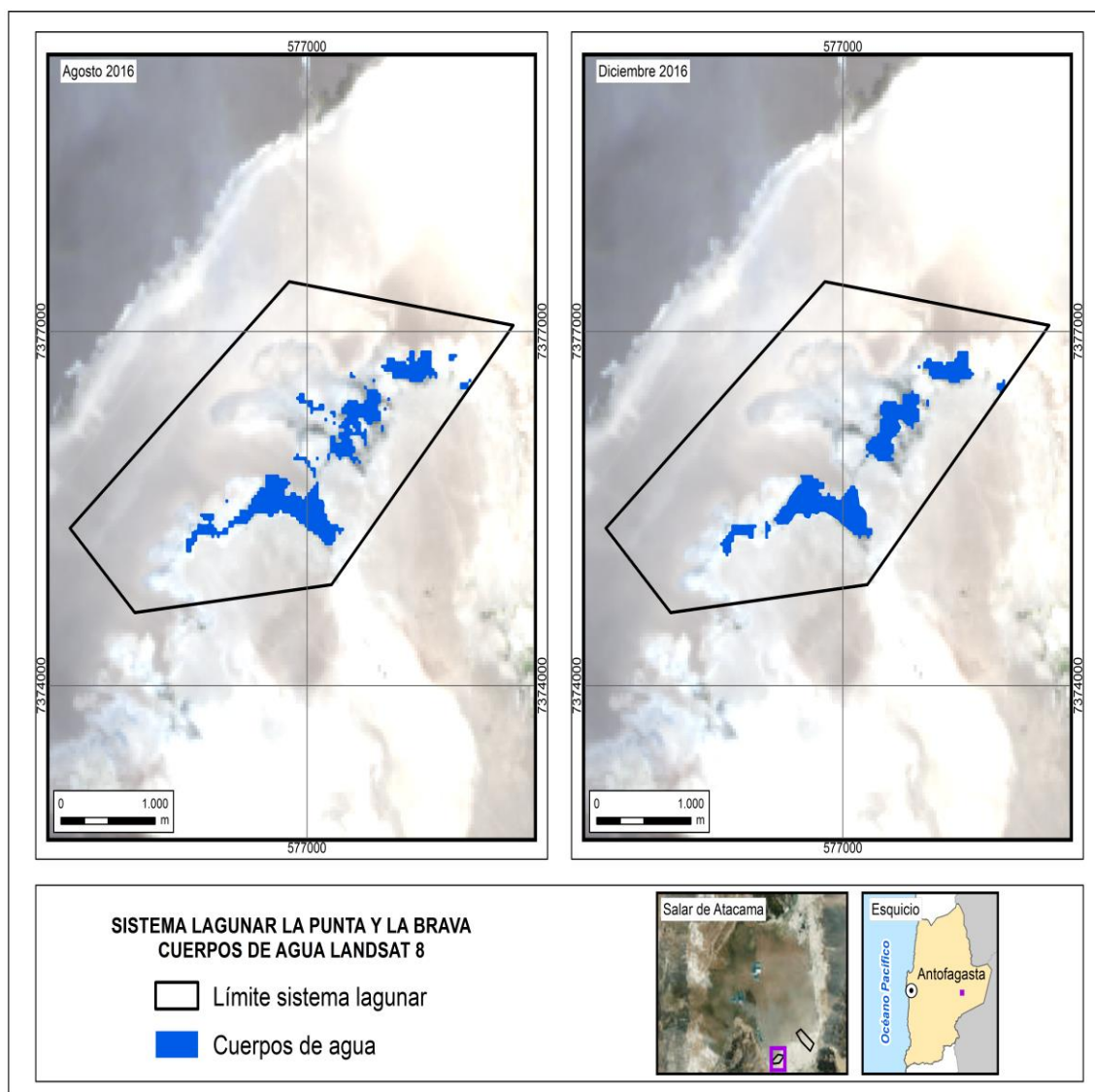
En el monitoreo de verano, la superficie de coberturas lagunares disminuyó en 6,6 ha, en imágenes Pleiades 1A, y en 7,6 ha, en imágenes Landsat 8, en comparación con las superficies lagunares de invierno. Esta disminución se presenta en un contexto característico del comportamiento estacional, dado por el efecto de evaporación y por el aumento de flujos subsuperficiales y subterráneos en época invernal, que tiene efectos importantes sobre la fisonomía irregular de este sector, con bordes menos definidos y presencia de vegetación (DGA, 2014; Cornellà, O. et al, 2009). La Figura N° 5-7 y Figura N° 5-8 muestran las diferencias de las superficies lagunares entre monitoreos en imágenes Pleiades 1A y Landsat 8, respectivamente.

Figura N° 5-7. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, 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 y diciembre 2016

Figura N° 5-8. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, 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 y diciembre 2016

5.2.3 Peine

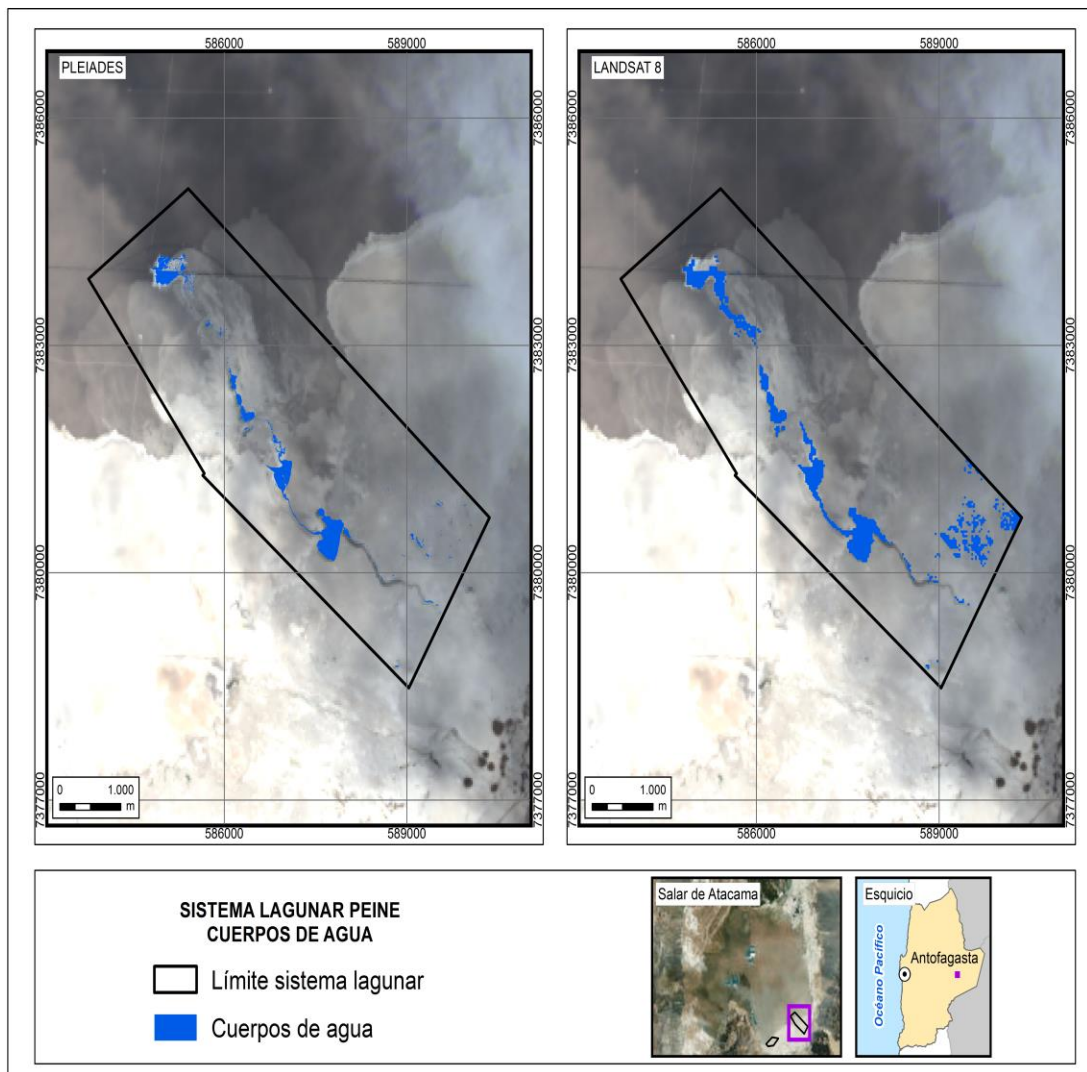
a. Comparación con registros históricos de línea de base

En el sistema lagunar Peine, los resultados del modelo de clasificación con imágenes de alta resolución Pleiades-1A, arrojaron una superficie de cuerpos de agua de 50,2 ha en diciembre 2016 (Figura N° 5-9 y Figura N° 5-10). La comparación con las coberturas de línea de base, estimadas desde este mismo tipo de imágenes satelitales (Adenda 5 RWL, 2015), indica que la cobertura actual disminuye en 23,4 ha (31,8%) respecto del máximo histórico (73,6 ha), y aumenta 1,3 ha

(2,4%) con respecto al mínimo registrado; aunque los registros históricos fueron determinados usando imágenes del periodo marzo-abril, mientras que el área determinada en el presente estudio corresponde a una condición de verano (diciembre), los valores aún se encuentran sobre los rangos mínimos y responderían condiciones estacionales. La Figura N° 5-10 muestra la comparación de superficies con los registros históricos en la zona, en forma gráfica y numérica.

Este sistema, representa el mejor ajuste obtenido a partir del modelo de clasificación con un índice *Kappa* de 0,91. La disminución de la superficie estimada en la presente campaña (fase de operación) respecto a la situación de línea base, se puede atribuir a varios factores, entre los que se cuentan: i) variabilidad estacional intranual ii) variabilidad estacional interanual; iii) robustecimiento de la metodología del procesamiento de las imágenes (detalles en sección 6.2)

Figura N° 5-9. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades-1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Peine.



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

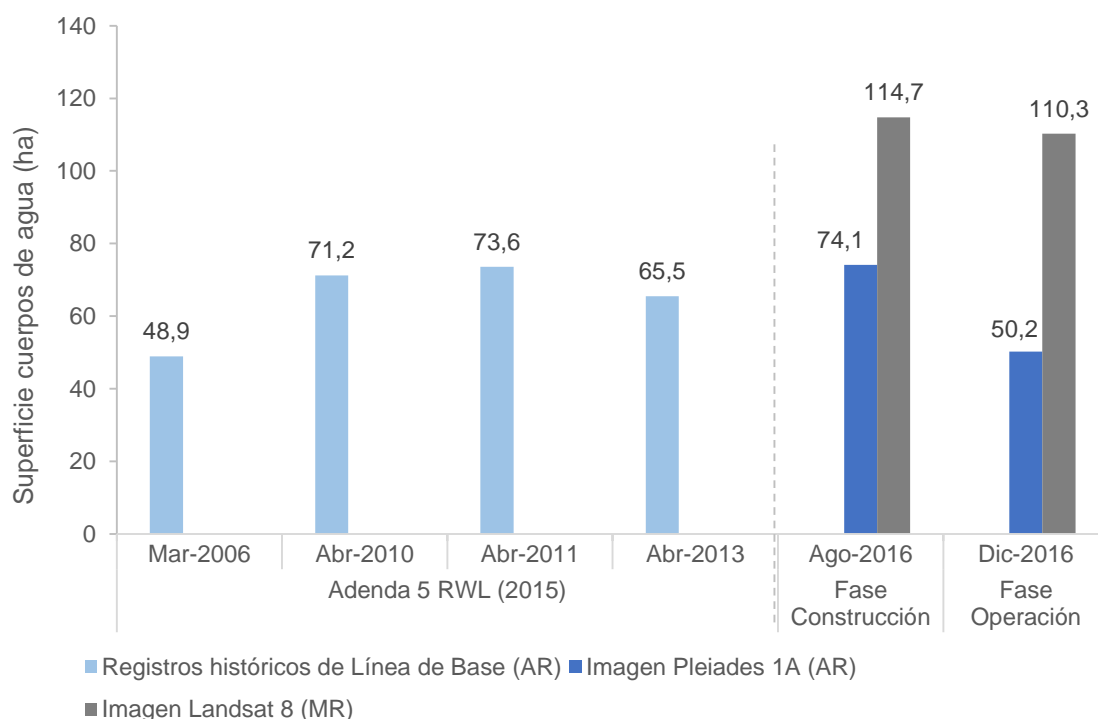
b. Comparación entre imágenes Pleiades y Landsat

En el sistema lagunar Peine, desde las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 110,3 ha en diciembre de 2016. La diferencia con el registro desde imágenes de alta resolución Pleiades-1A, representa un 54,5% (60,1 ha) más en la superficie desde Landsat 8. La Figura N° 5-9 y la Figura N° 5-10, muestran respectivamente la representación espacial y la comparación de las superficies de los cuerpos de agua con los registros históricos en el sector.

Cabe destacar que este sistema lagunar se encuentra inmerso en un sustrato salino homogéneo, que rodea completamente las lagunas y sin recubrimiento vegetal; estas características y junto a los parámetros espectrales usados en el modelo, permitieron reconocer con un alto grado de precisión las lagunas y sus canales de conexión (índices *Kappa* de 0,83 en Landsat 8 y 0,91 en Pleiades-1A).

El aumento de la superficie estimada en el caso de Landsat 8, es esperable y se debe principalmente a su menor resolución (30m) respecto a las imágenes Pleiades-1A, conllevando con ello la incorporación de zonas húmedas, que no correspondían estrictamente a zonas inundadas (cuerpos de agua) en el sistema lagunar. Este resultado, se puede confirmar por la reducción en el ajuste del modelo en el caso de Landsat 8, con una disminución de 7,7 en el índice *Kappa* respecto a la cobertura de la imagen Pleiades-1A.

Figura N° 5-10. Registros históricos y superficie actual de los cuerpos de agua, sistema lagunar Peine.



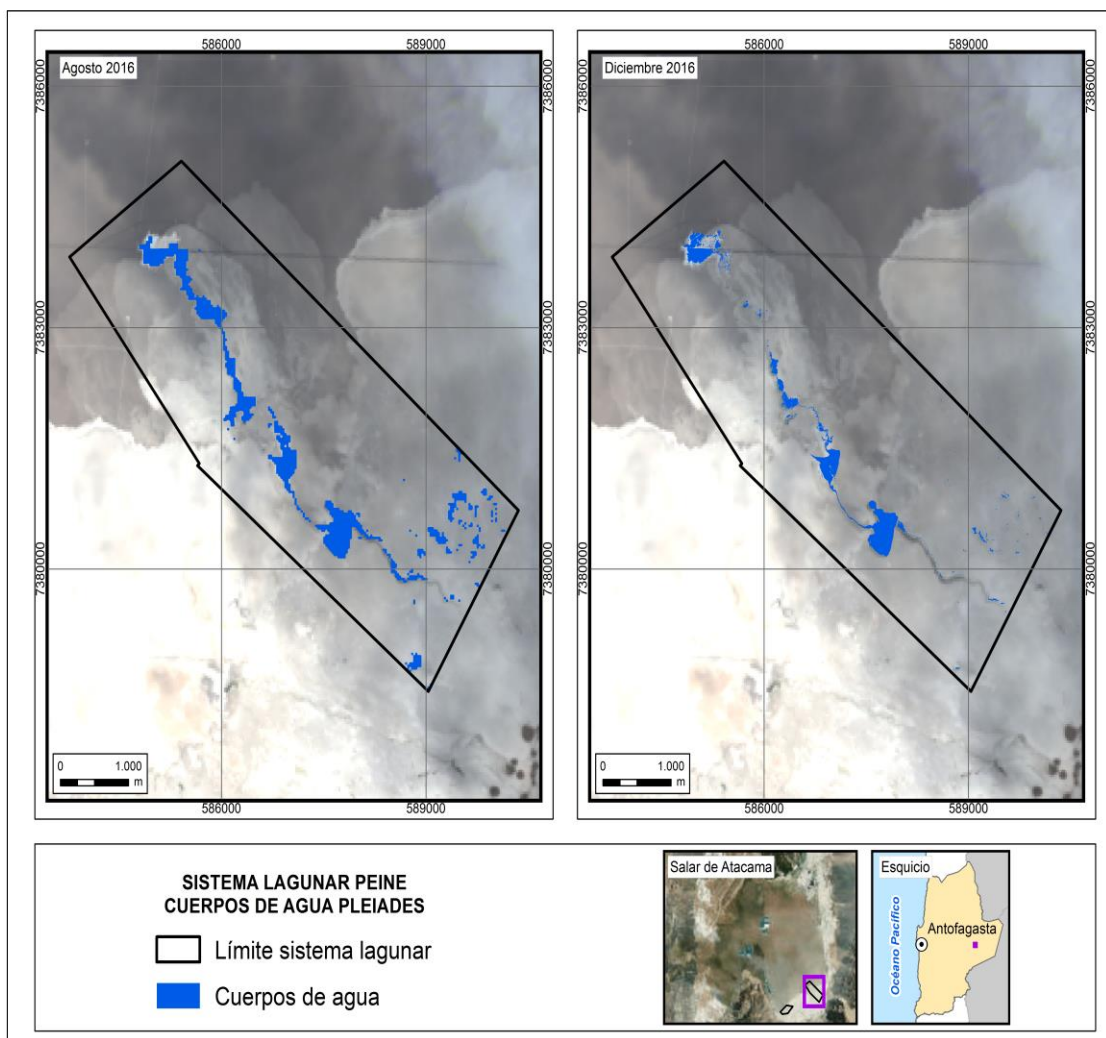
Dónde; **MR**: Imagen de Mediana Resolución (pixel 30m); **AR**: Imágenes de alta resolución (pixel menor a 4m).

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

c. Comparación entre monitoreos, construcción versus operación

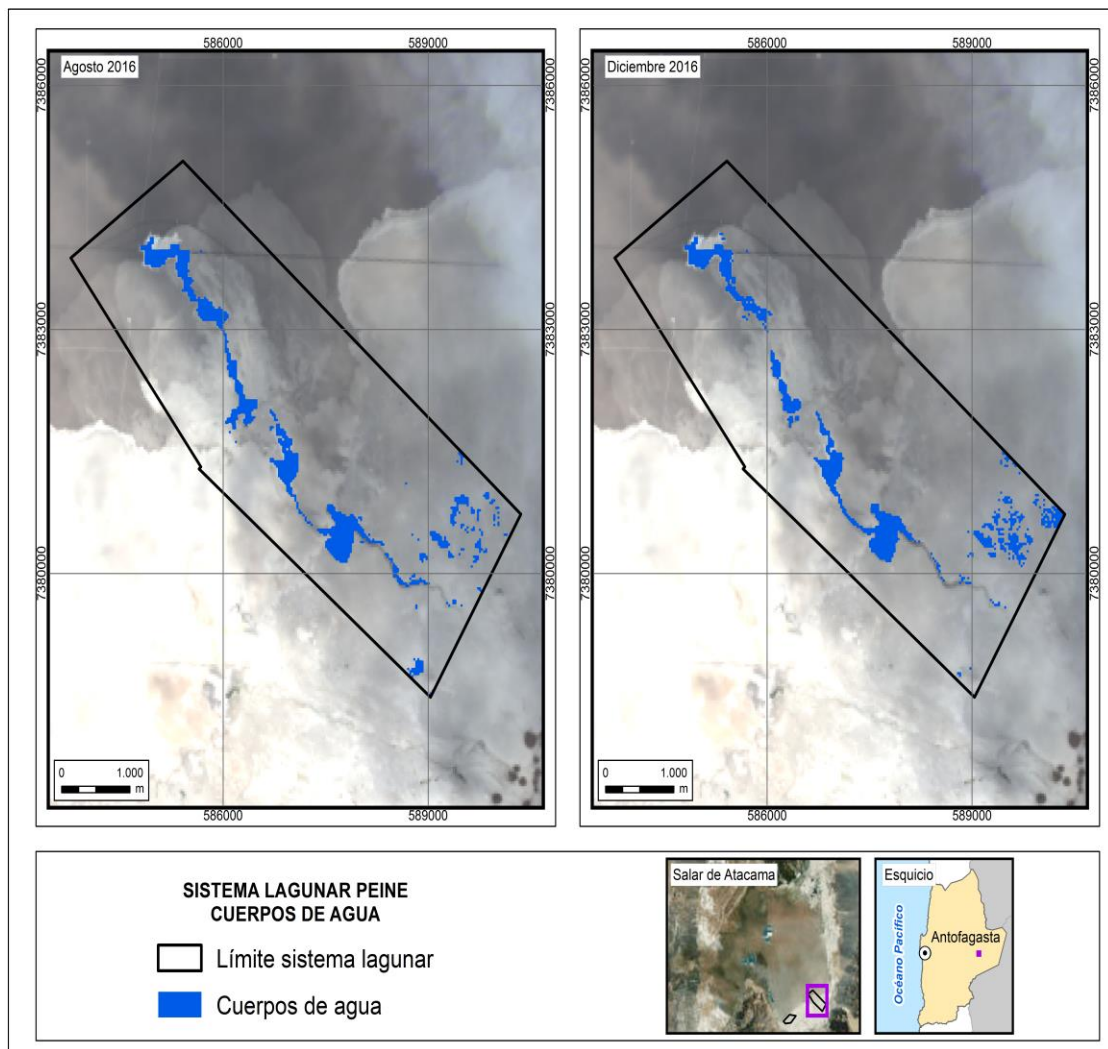
En el monitoreo de verano, la superficie de coberturas lagunares disminuyó en 23,9 ha, en imágenes Pleiades 1A, y en 4,5 ha, en imágenes Landsat 8, en comparación con las superficies lagunares de invierno. Esta disminución es la mayor entre monitoreos dentro de todas las superficies de los sistemas lagunares descritos, lo que se puede explicar por la presencia de numerosos cuerpos lacustres de menor extensión, específicamente al norte de este sistema, originados por la presencia de afloramientos de agua subterránea ligados a la dinámica de una cuña salina (Cornellà, O. *et al*, 2009). No obstante, se presenta en un contexto característico del comportamiento estacional, dado por el efecto de evaporación y por el aumento de flujos subsuperficiales y subterráneos en época invernal (DGA, 2014). La Figura N° 5-11 y Figura N° 5-12 muestra las diferencias de las superficies lagunares entre monitoreos en imágenes Pleiades 1A y Landsat 8, respectivamente.

Figura N° 5-11. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Peine, a partir de imágenes Pleiades 1A.



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

Figura N° 5-12. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Peine, a partir de imágenes Landsat 8.



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

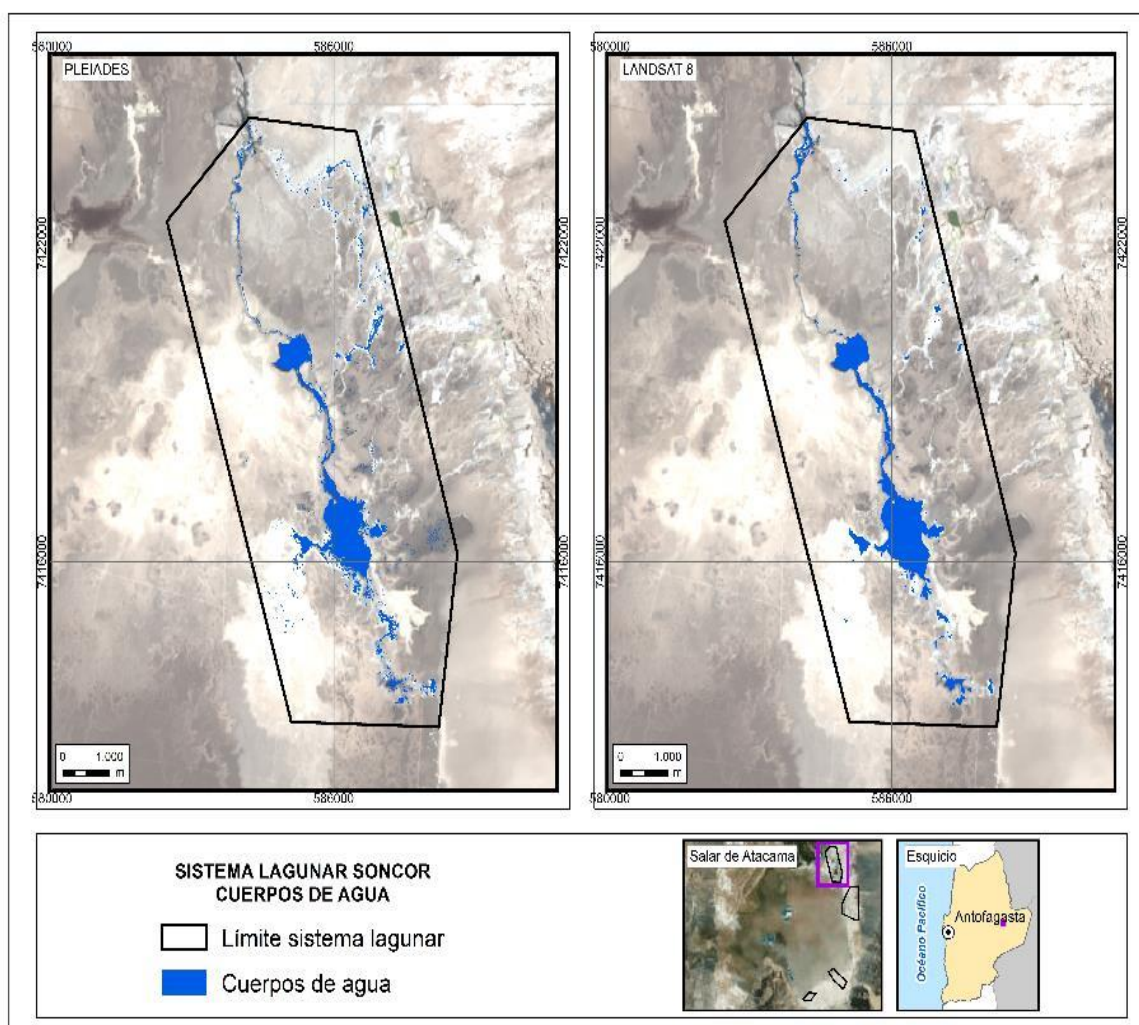
5.2.4 Soncor

a. Comparación con registros históricos de línea de base

En el sistema lagunar Soncor, la cobertura de cuerpos de agua estimada a partir de imágenes satelitales de alta resolución Pleiades 1A, abarca una superficie de 255,6 ha en diciembre (Figura N° 5-13 y Figura N° 5-14). La comparación con los registros históricos de línea de base, estimados desde imágenes de alta resolución (Adenda 5 RWL, 2015), indica que la cobertura actual supera en 63,2 ha (24,7%) al mínimo histórico (192,4 ha), el cual fue determinado usando únicamente imágenes del periodo marzo-abril, mientras que el área determinada en el presente estudio corresponde a una condición de “verano” (diciembre). En tanto, el valor del actual monitoreo es superior en 21,4 ha (8,4%) respecto del máximo histórico (234,2 ha). La Figura N° 5-14 muestra la comparación gráfica y numérica de las superficies con los registros históricos en la zona.

La diferencia entre la superficie estimada en la presente campaña (fase construcción) respecto a la situación de línea base, se puede atribuir a varios factores, entre los que se cuentan: i) variabilidad estacional intranual ii) variabilidad estacional interanual; iii) robustecimiento de la metodología del procesamiento de las imágenes (detalles en sección 6.2). En el caso particular de este sistema lagunar, las mejoras metodológicas y la validación complementaria implementadas permitieron aumentar la sensibilidad de la detección del cuerpo de agua por el sureste, con respecto a lo identificado en la línea base, lo cual se encuentra validado gracias al buen ajuste del índice *Kappa* de 0,90 en este sector y según la respuesta espectral de todos los parámetros vinculados en el modelo (**ANEXO 9-21** y **ANEXO 9-22**).

Figura N° 5-13. Cobertura de cuerpos de agua determinada a través de imágenes satelitales Pleiades 1A y Landsat 8 en el sistema lagunar Soncor.



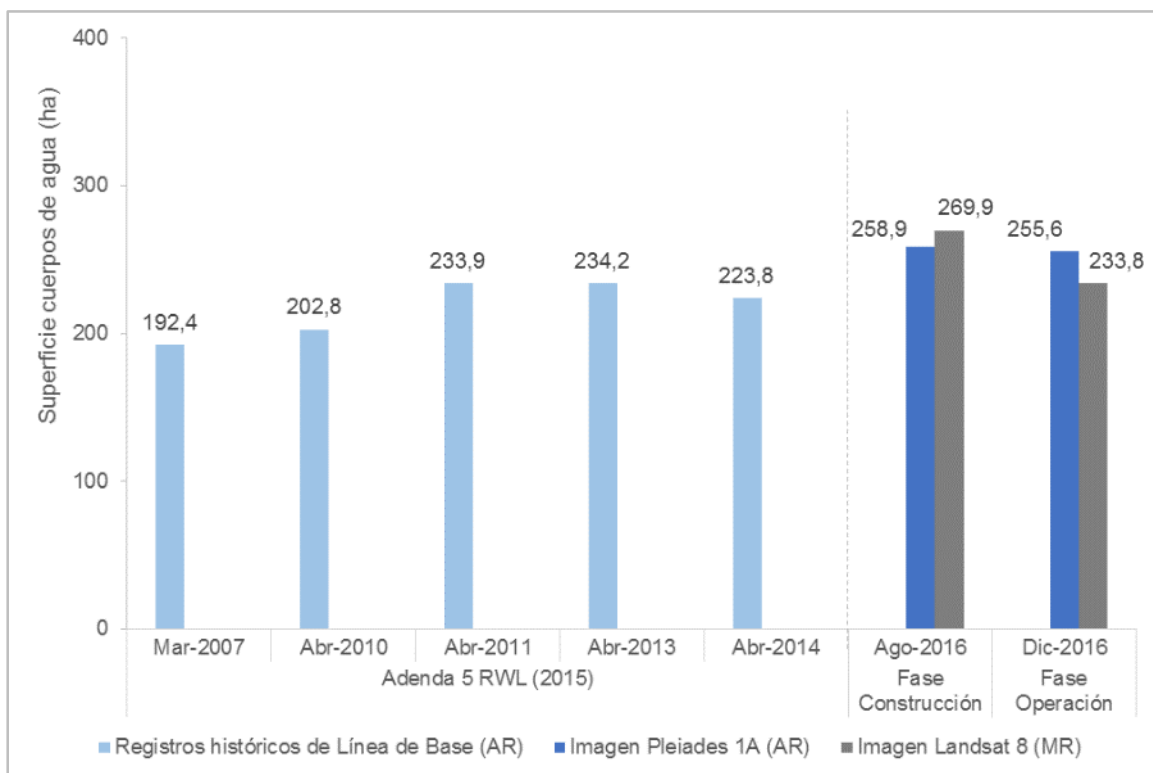
Fuente: Cedrem Consultores en base a clasificación supervisada de imágenes satelitales de diciembre 2016.

b. Comparación entre imágenes Pleiades y Landsat

En el sistema lagunar Soncor, desde las imágenes Landsat 8 se calculó que la cobertura de cuerpos de agua abarca una superficie de 233,8 ha en diciembre de 2016. La diferencia con el registro desde imágenes de alta resolución Pleiades 1A, representa un 9,4% (21,8 ha) menos que en la superficie desde Landsat 8, lo cual es esperable debido a las diferencias de resolución entre ambas. La Figura N° 5-13 y Figura N° 5-14, muestran respectivamente la representación espacial y la comparación de las superficies de los cuerpos de agua con los registros históricos en la zona.

El sistema lagunar Soncor, al igual que el sistema lagunar Peine, presenta una fisonomía marcada dentro de un sustrato homogéneo de costra salina sin presencia de recubrimientos vegetales. Estas características permitieron obtener uno de los mejores ajustes en los modelos de clasificación, con índices *Kappa* de 0,77 en Landsat 8 y 0,90 en Pleiades 1A.

Figura N° 5-14. Registros históricos y superficie actual 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.

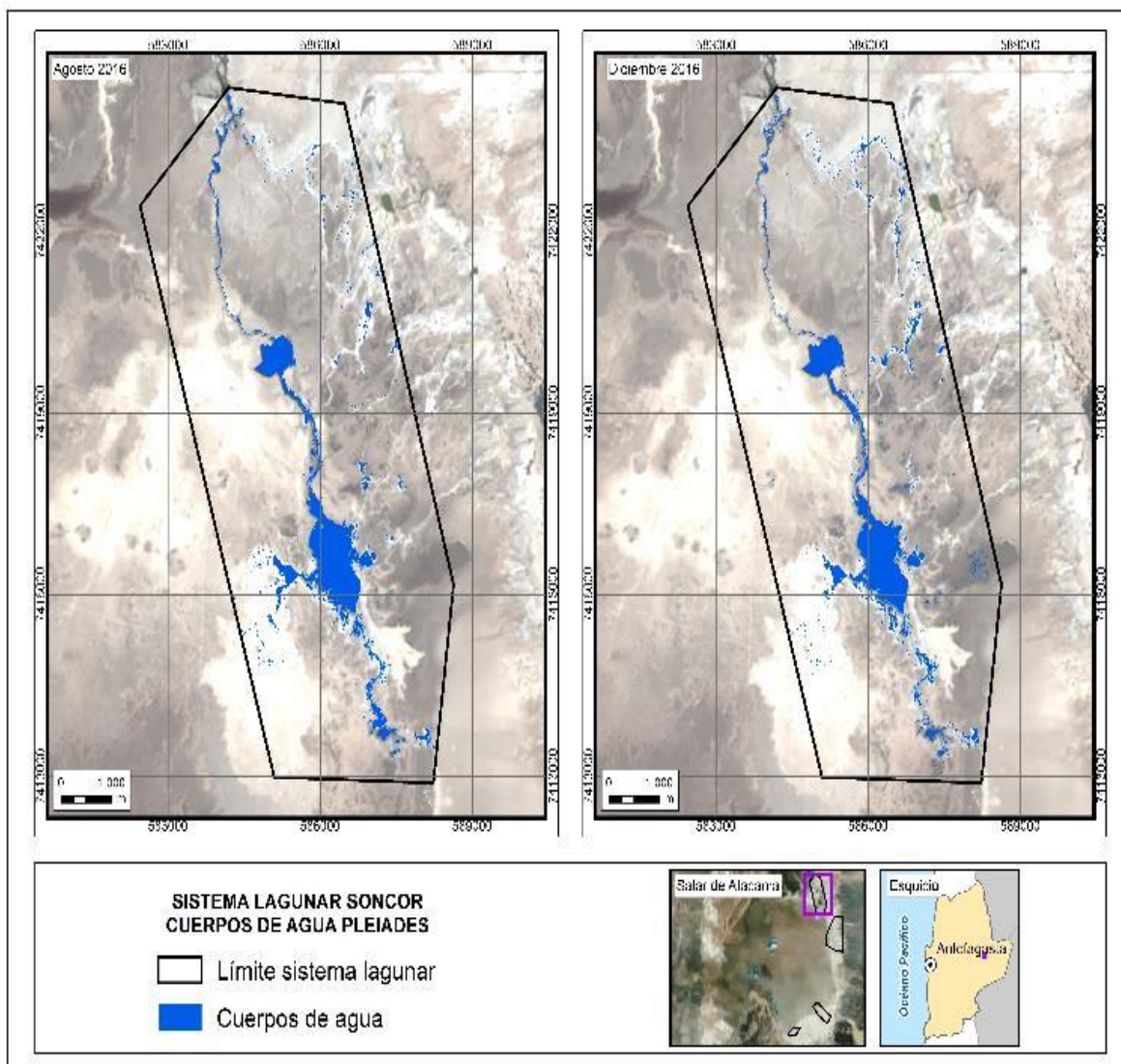
c. Comparación entre monitoreos, construcción versus operación

En el monitoreo de verano, la superficie de coberturas lagunares disminuyó en 3,2 ha, en imágenes Pleiades 1A, y en 36,1 ha, en imágenes Landsat 8, en comparación con las superficies lagunares de invierno, presentando la menor diferencia entre monitoreos, que puede explicarse por

los ajustes realizados en base a la validación complementaria, principalmente al sur del sistema, y a que gran parte de las superficies lagunares de Soncor se forman en un sustrato de baja permeabilidad, debido a la naturaleza de los sedimentos depositados, generando la mayor estabilidad entre los sistemas lagunares señalados (Ortiz, C. *et al*, 2014). Igualmente, esta dinámica se presenta en un contexto característico del comportamiento estacional, dado por el efecto de evaporación y por el aumento de flujos subsuperficiales y subterráneos en época invernal (DGA, 2014).

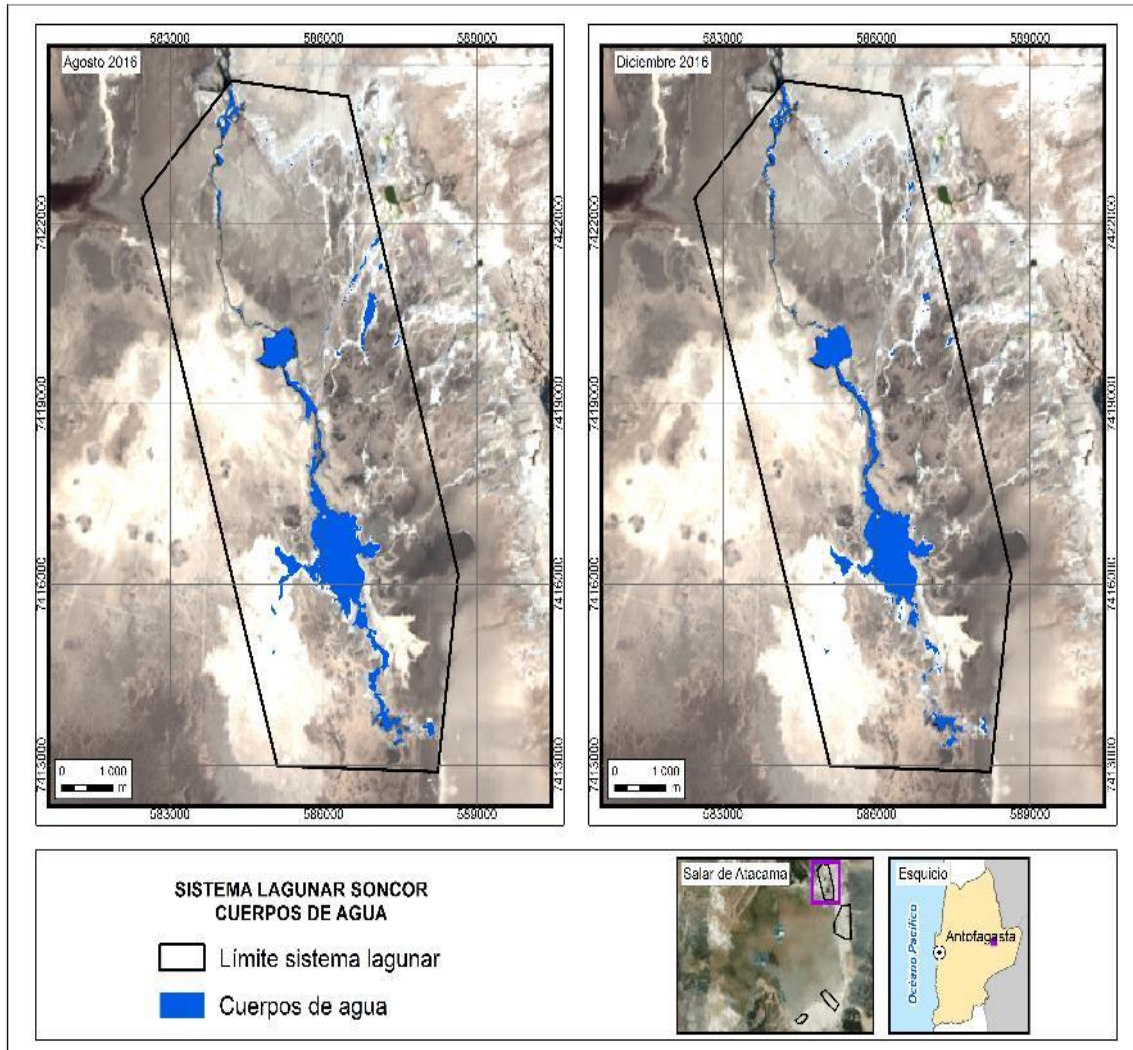
La Figura N° 5-15 y Figura N° 5-16 muestran las diferencias de las superficies lagunares entre monitoreos en imágenes Pleiades 1A y Landsat 8, respectivamente.

Figura N° 5-15. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Soncor, a partir de imágenes Pleiades 1A y Landsat 8.



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

Figura N° 5-16. Registros de superficies lagunares de agosto 2016 y diciembre 2016, sector Soncor, a partir de imágenes Landsat 8.



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

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 presentó un ajuste considerable para todos los sistemas lagunares, con valores entre 0,82 y 0,91 del índice *Kappa* (Tabla N° 6-1), donde los mayores ajustes se presentan en Peine y Soncor, debido a la fisonomía de estos sistemas lagunares, mostrando una mayor definición de los cuerpos de agua, por sus características de topografía y tipo de sustrato, ya que se encuentra total o parcialmente delimitado por 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.

En cuanto al valor *Kappa* más bajo reportado en La Punta y La Brava (0,82) y Aguas de Quelana (0,86), éstos pueden explicarse por una menor precisión en la definición de la cobertura de cuerpos de agua estimada dentro de los sectores en estudio. Estos valores más bajos en el ajuste del modelo, se deben principalmente a que estos sistemas lagunares poseen un gradiente de la laguna que conforma un ecotono de vegetación, el cual condujo a una estimación menos precisa de los límites de la superficie de agua proveniente principalmente de los parámetros NDVI y NIR. A pesar de esto, los valores son también considerables.

El ajuste de los modelos a partir de Pleiades-1A y Landsat 8 por sistema lagunar, fue mayor desde Pleiades-1A, con una diferencia máxima de +0,20 en el índice *Kappa*, determinada en el caso de La Punta y La Brava. Estas variaciones menores, se justifican por la mayor resolución espacial en el caso de Pleiades-1A (2 m), logrando distinguir con mejor precisión aquellos cuerpos de agua, que desde imágenes Landsat (30 m), que por su resolución dificulta la interpretación de éstos.

La variación del índice *Kappa* respecto del primer monitoreo (invierno), corresponde a valores entre +0,01 (Soncor) y +0,37 (La Punta y La Brava), desde Pleiades-1A, y -0,01 (Soncor) y +0,15 (La Punta y La Brava), desde Landsat 8. Cabe señalar que los valores de variación mínima presentados en los sistemas Soncor y Peine, desde ambos tipos de imágenes, y la baja variabilidad del valor en el sistema de Peine desde imágenes Landsat 8, se asocian con el ajuste en base a la validación complementaria y con la estabilidad del sistema, en tanto, el valor de variación más alto en el sistema de La Punta y La Brava, está estrechamente relacionado con el ajuste realizado en base a la validación complementaria, lo que permitió disminuir considerablemente la incertidumbre que mostró el valor del índice *Kappa* en este sistema durante el primer monitoreo.

Tabla N° 6-1. Consolidado de índices *Kappa* de validación del modelo de clasificación por sistema lagunar.

Sistema Lagunar	Monitoreo Fase Construcción							
	Agosto 2016				Diciembre 2016			
	PLEIADES 1A -AR		LANDSAT 8 -MR		PLEIADES 1A -AR		LANDSAT 8 -MR	
	Superficie (ha)	Índice <i>Kappa</i>	Superficie (ha)	Índice <i>Kappa</i>	Superficie (ha)	Índice <i>Kappa</i>	Superficie (ha)	Índice <i>Kappa</i>
Aguas de Quelana	33,4	0,72	58,2	0,72	18,8	0,86	41,6	0,74
La Punta y La Brava	47,4	0,45	62,6	0,47	40,9	0,82	55,0	0,62
Peine	74,1	0,89	114,7	0,83	50,2	0,91	110,3	0,83
Soncor	258,9	0,89	269,9	0,78	255,6	0,90	233,8	0,77

Fuente: Cedrem Consultores.

6.2 Análisis de comparación con registros históricos de línea de base

El análisis comparativo de las superficies de cuerpos de agua determinadas para la fase de operación con respecto a los registros históricos se presenta en la Tabla N° 6-2.

Tabla N° 6-2. Comparación de superficies de cuerpos de agua estimadas a través de imágenes satelitales (Pleiades 1A y Landsat 8) y datos obtenidos en el monitoreo 2016 (invierno y verano), respecto de los registros de línea de base (Adenda 5 RWL, 2015).

Sistema Lagunar	Superficies (ha) de registros históricos (Adenda 5 RWL, 2015)			Superficies (ha) Pleiades 1A de alta resolución			Superficies (ha) Landsat 8 de media resolución		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Invierno	Verano	Promedio anual	Invierno	Verano	Promedio anual
Aguas de Quelana	22,2	33,1	11,3	33,4	18,8	26,1	58,2	41,6	49,9
La Punta y La Brava	33,82	35	31,6	47,4	40,9	44,2	62,6	55	58,8
Peine	64,8	73,6	48,9	74,1	50,2	62,2	114,7	110,3	112,5
Soncor	217,4	234,2	192,4	258,9	255,6	257,2	269,9	233,8	251,9

Fuente: Cedrem Consultores

En términos generales, el valor promedio anual de las superficies lagunares correspondientes al monitoreo 2016, para los sectores Aguas de Quelana (+3,9 ha (17,7%)), La Punta y La Brava (+10,4 ha (30,7%)) y Soncor (+39,8 ha (18,3%)), superan los valores del promedio histórico de cada sector. En tanto, el valor del promedio anual del sector Peine es inferior en 2,6 ha (-4,0%), respecto del promedio histórico de línea de base. Se observa además que los valores de las superficies estimadas para verano 2016 están por sobre los mínimos históricos en todos los sistemas lagunares, donde el rango de valores está entre 63,2 ha para Soncor y 1,3 ha para Peine. En relación a los valores históricos máximos, el sistema Peine muestra una superficie de 23,4 ha y el sistema Aguas de Quelana de 14,3 ha por debajo de los valores señalados, mientras que, el sistema La Punta y La Brava presenta un valor de 5,9 ha y el sistema Soncor de 21,4 ha por sobre el mismo valor señalado para cada sector. Los valores por sobre el máximo histórico de las superficies estimadas en verano de 2016 para los sistemas La Punta y La Brava y Soncor, están asociados a la diferencia estacional en la captura de imágenes, lo que puede influir en la variación descrita.

Como se menciona anteriormente, las diferencias señaladas respecto a la situación de línea base, se pueden atribuir a varios factores, entre los que se cuentan: i) variabilidad estacional intranual ii) variabilidad estacional interanual, dado que ambas condiciones tienen directa relación con la recarga del acuífero en cada periodo; iii) robustecimiento de la metodología del procesamiento de las imágenes, que favorece la mayor definición de las respuestas espectrales de las diferentes coberturas, y iv) validación complementaria, cuya contribución corresponde a la depuración de los límites de los cuerpos de agua, prevaleciendo el registro de validación complementaria de terreno, en lo que dice relación con la clasificación final del recubrimiento de suelo, por sobre el resultado del modelo de invierno 2016, lo que implica la calibración del modelo de clasificación en función de lo observado en terreno.

En cuanto a la comparación de los resultados obtenidos con imágenes de alta resolución (Pleiades 1A) y las imágenes de media resolución (Landsat 8), se señala que los valores del promedio anual para todos los sistemas lagunares, desde Landsat 8, superan los valores de promedios históricos. El rango de valores corresponde a 47,7 ha en el sector de Peine y 25 ha en el sector de La Punta y La Brava. Se observa además que los valores obtenidos en verano desde la imagen de media resolución, superan tanto los valores mínimos históricos como los máximos históricos. En forma paralela, al comparar los resultados del monitoreo 2016 obtenidos a partir de cada tipo de imagen, las superficies lagunares desde Landsat 8 correspondientes a Aguas de Quelana, La Punta y La Brava y Peine, superan a las superficies lagunares desde Pleiades 1A. No obstante, el sector de Soncor presenta un valor de 5,4 ha (2,1%) por debajo del valor desde Pleiades 1A. En términos generales, estas disparidades se explican por la diferencia de resolución de cada imagen, que conlleva en una escala diferente de resultados del modelo de clasificación.

6.3 Análisis de límites considerados en el seguimiento de los 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*, y según el análisis comparativo de las superficies de cuerpos de agua por sistema lagunar, presentado en este reporte (sección 5.2), se obtuvo que las superficies de los cuerpos de agua se encuentran dentro de los límites de seguimiento establecidos, considerando el criterio indicado en la RCA N°21/2016, donde se señala 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 puede observar en los registros históricos presentados y en los resultados del monitoreo de la actual campaña de verano 2016.

Cabe destacar que el actual monitoreo, describe los cuerpos de agua en fase de operación del Proyecto, el cual conservó los ajustes metodológicos respecto de la línea de base presentada en la Adenda 5 del Proyecto RWL (2015) y muestra los resultados del ajuste de las superficies lagunares de invierno o fase de construcción, que conllevó a la calibración del modelo de clasificación, lo que responde al mejoramiento en la precisión y congruencia con los datos de terreno.

7 CONCLUSIONES

La campaña de verano 2016, corresponde a la segunda campaña del PSAH luego de haber sido aprobado el proyecto RWL, a través de la **RCA N°21 de febrero 2016** y que presenta una **medición y análisis de este período, en etapa de operación del Proyecto.**

En este reporte se consideraron los ajustes metodológicos planteados para el modelo de clasificación de invierno 2016 (ANEXO 9-4), robusteciéndolos mediante una validación complementaria, que consistió en la adición de puntos en terreno en zonas donde existen diferencias significativas de cobertura de agua entre la línea de base y la campaña de invierno. Esta validación contribuyó con la depuración de los límites de los cuerpos de agua; prevaleciendo el registro de validación de terreno por sobre la clasificación final del recubrimiento de suelo del modelo de invierno 2016 en las zonas señaladas, lo que implica la calibración del modelo de clasificación en función de lo observado en terreno. De esta forma se redujo la incertidumbre, mejorando considerablemente los resultados del índice *Kappa*, en que el rango de diferencia de

valores en relación a la disminución de la incertidumbre corresponde a un 1% en el sector de Peine y 31% en el sector de La Punta y La Brava, en las superficies calculadas en invierno, y un rango entre 0,82, para La Punta y La Brava, y 0,91 para Peine, en las superficies calculadas en verano, corroborando así la validación del modelo de clasificación.

De acuerdo con los resultados obtenidos en verano 2016, se estimaron superficies lagunares correspondientes a 18,8 ha para el sistema lagunar Aguas de Quelana, 40,6 ha para La Punta y La Brava, 50,2 ha para Peine y 255,6 ha para Soncor.

Las diferencias señaladas respecto a la situación de línea base, se pueden atribuir a varios factores, entre los que se cuentan: i) variabilidad estacional intranual ii) variabilidad estacional interanual, dado que ambas condiciones tienen directa relación con la recarga del acuífero en cada periodo; iii) robustecimiento de la metodología del procesamiento de las imágenes, que favorece la mayor definición de las respuestas espectrales de las diferentes coberturas, y iv) validación complementaria, cuya contribución corresponde a la depuración de los límites de los cuerpos de agua, prevaleciendo el registro de validación complementaria de terreno, en lo que dice relación con la clasificación final del recubrimiento de suelo, por sobre el resultado del modelo de invierno 2016, lo que implica la calibración del modelo de clasificación en función de lo observado en terreno.

Cabe destacar que el actual monitoreo describe los cuerpos de agua en condiciones de operación, y que junto con los resultados del monitoreo en fase de construcción del Proyecto, el cual fue sometido a la calibración descrita, fueron comparados con los registros de línea de base y, en adelante, serán parte del registro de la etapa de seguimiento, que se realizará con frecuencia semestral.

Complementariamente, se considera que los modelos obtenidos presentan un ajuste considerable en la mayoría de los sectores, se propone seguir utilizando el método ATCOR dada su ventaja comparativa en términos de remoción del efecto de la dispersión en la radiación proveniente de la atmósfera y de utilizar los parámetros espectrales sumados en el presente estudio (NDVI en Pleiades-1A y Landsat 8, y la transformada *Tasseled Cap*, Wetness en Landsat 8).

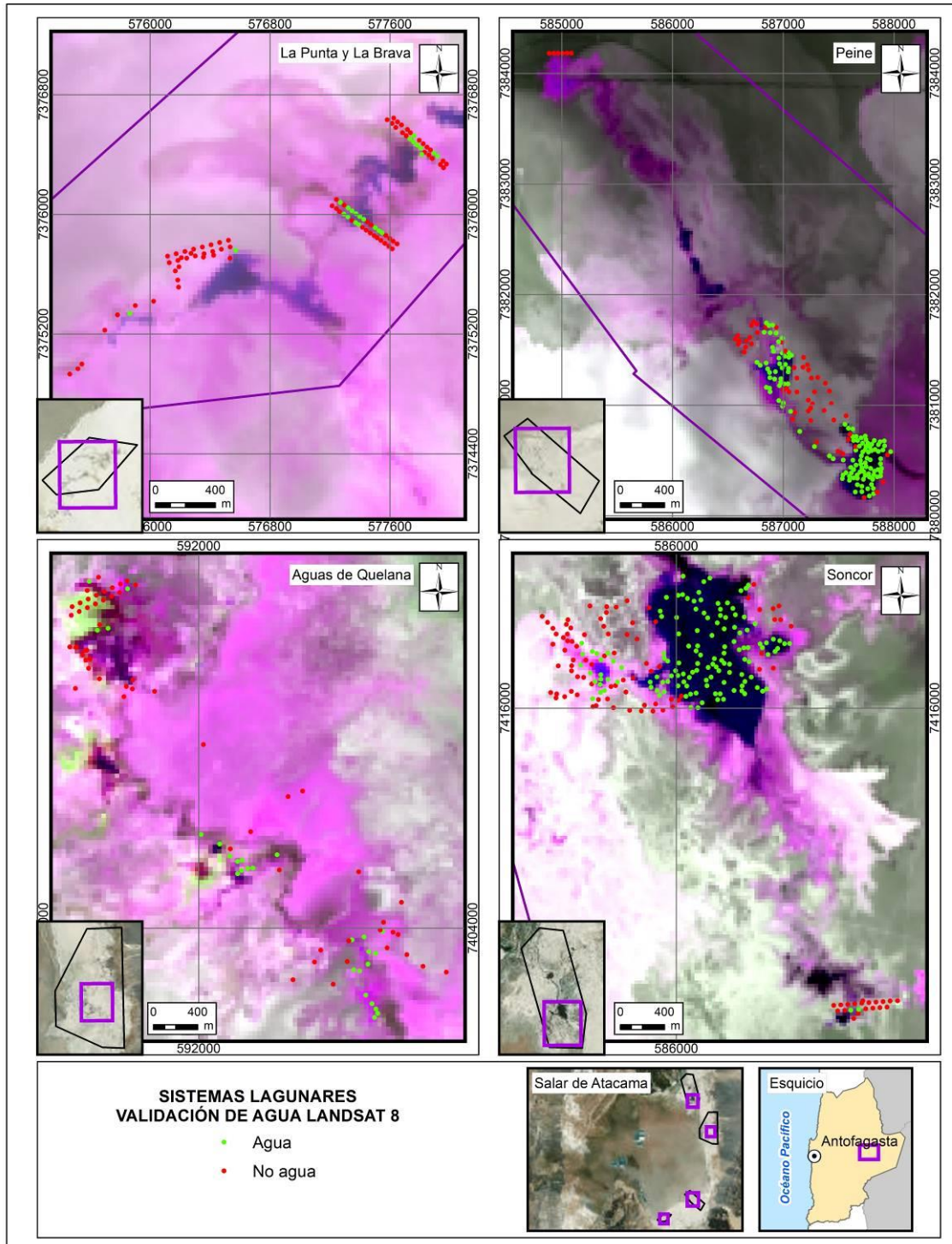
8 REFERENCIAS

- Anexo 2, Adenda 5 EIA, Apéndice B. Del Proyecto RWL 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.
- CHANDER G., B. Markham, D. Helder. 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. 2009.
- 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, 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 Sensin, 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), Primer monitoreo de agosto 2016.
- 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 Sens.* 50, 3950–3957.

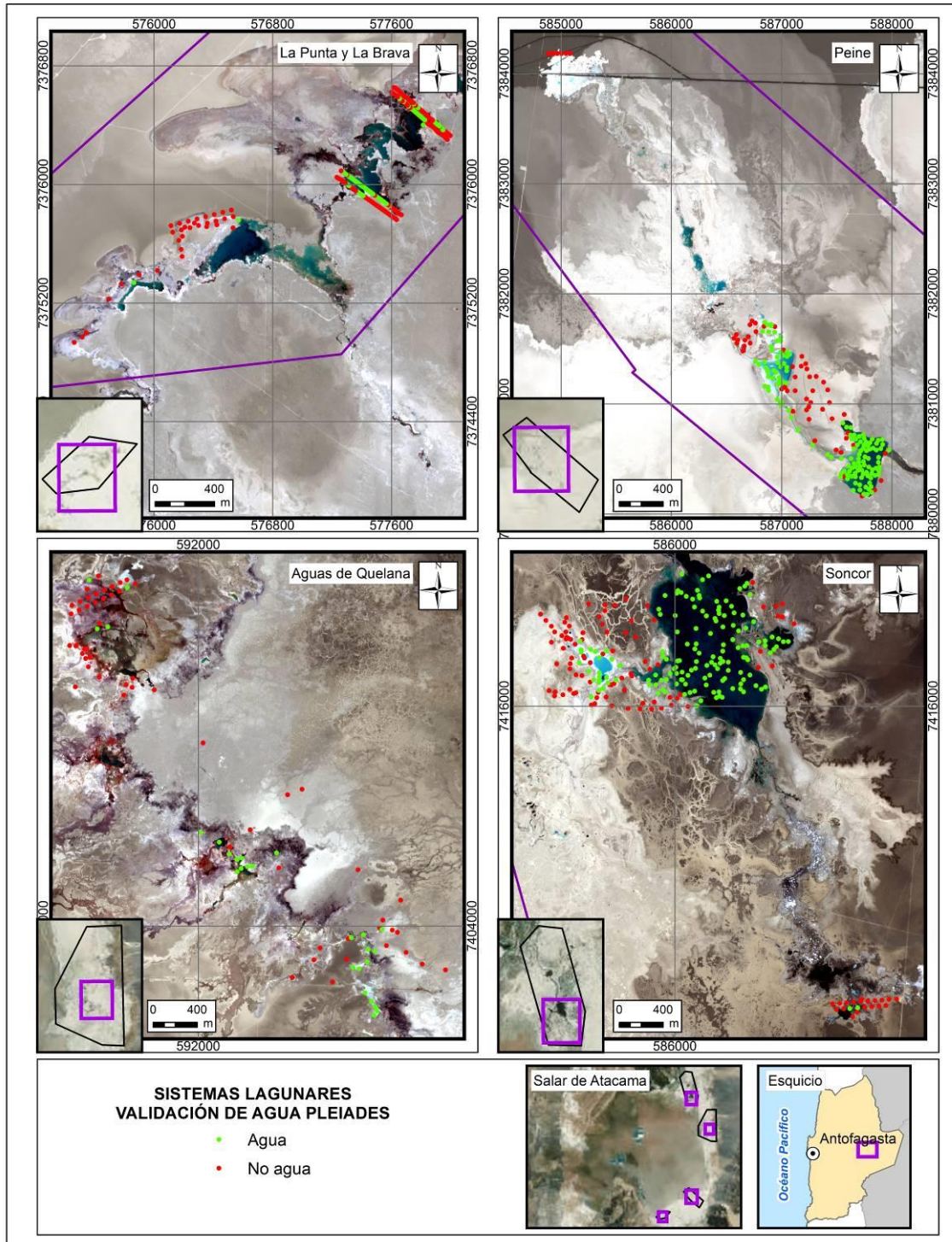
9 ANEXOS

ANEXO 9-1. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes LANDSAT 8.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-2. Distribución de puntos de validación en terreno para imágenes PLEIADES 1A.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-3. Coordenadas de puntos de validación en terreno

Archivo adjunto en formato Excel:

RWL_AGUA_PM_VALID_AR_L8_DIC_20170126.xlsx

ANEXO 9-4. 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 de acortar -a una semana- el plazo de captura de las imágenes (para toda el área de estudio) y de tal forma que coincidieran con las fechas de validación en terreno. 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 de la certidumbre en el modelo y por ende, conocer la bondad de ajuste en las coberturas obtenidas.
3. Procesamiento de imágenes satelitales – Corrección atmosférica	IARR (por su sigla inglés, promedio interno de reflectancia relativa).	ATCOR (por su sigla en inglés, Atmospheric & Topographic Correction)	ATCOR propende la remoción del efecto atmosférico, mientras que IARR lo estandariza sobre la imagen. Por lo mismo, ATCOR genera una respuesta espectral – corregida- más clara en los objetos de clasificación. La corrección ATCOR (con mejor efecto de remoción del error atmosférico), conllevó a que tanto los parámetros espectrales, como el modelo de clasificación, fueran más sensibles a la detección de cuerpos de agua.
4. Parámetros espectrales del modelo de clasificación	<ul style="list-style-type: none"> • NDWI, • Reflectancia NIR y • Reclasificación de bandas espectrales. 	<ul style="list-style-type: none"> • NDWI, • Reflectancia NIR, • Reclasificación de bandas espectrales (en Pleiades 1A), • NDVI, • Transformada Tasseled Cap • “Wetness” (en 	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

MATERIALES Y MÉTODOS CON MODIFICACIÓN	LÍNEA DE BASE (Adenda 5 RWL, 2015)	MONITOREO FASE DE OPERACIÓN (CEDREM Consultores)	DESCRIPCIÓN DE MODIFICACIÓN APLICADA
		Landsat 8)	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 altiplánico: Enero- Abril.	Durante Verano: Diciembre 2016	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 9-5. Metadata de Imágenes de alta resolución – Pleiades 1A

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

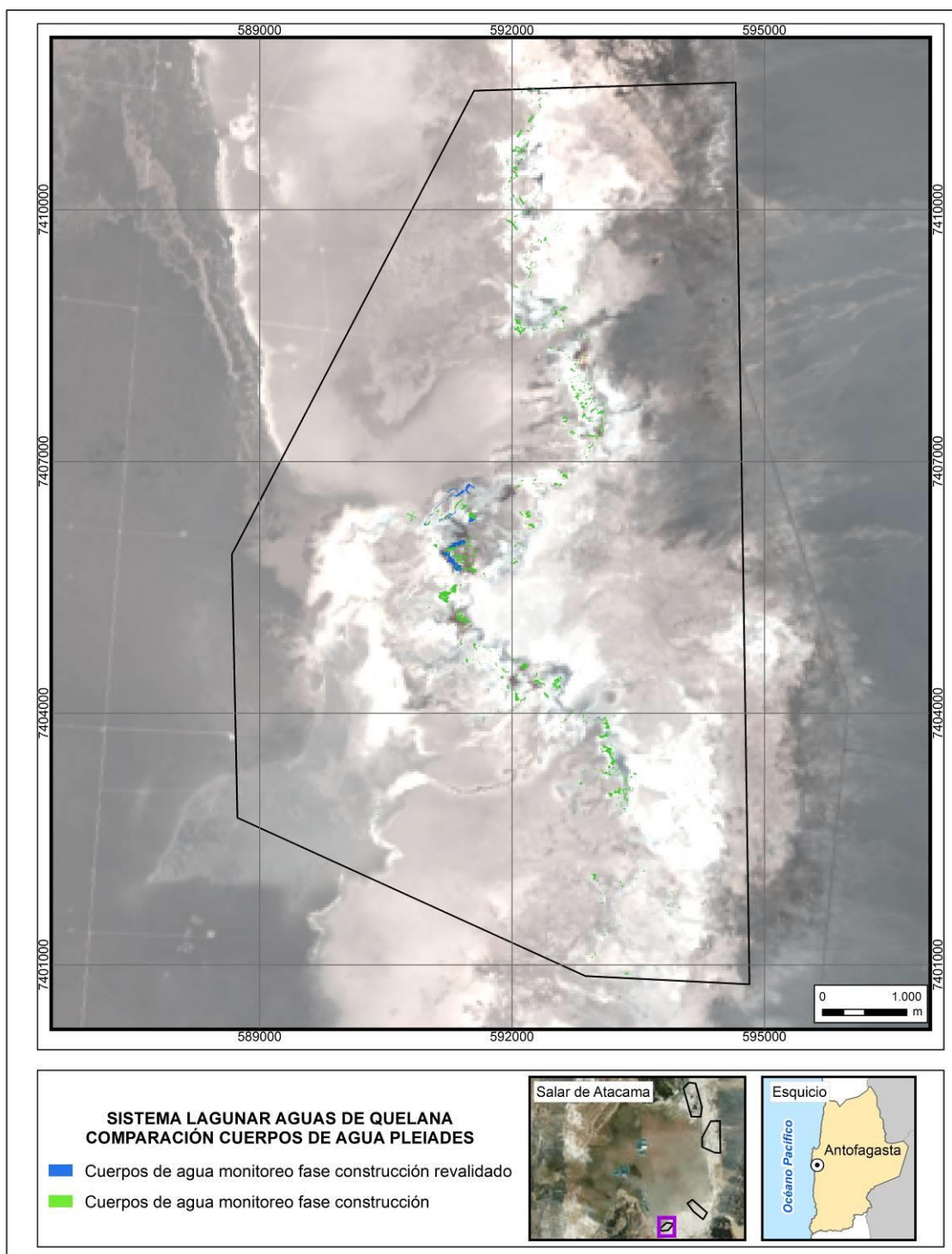
Metadata_IMA_Pleiades

ANEXO 9-6. Metadata de Imágenes de media resolución – Landsat

Archivo adjunto en formato pdf.

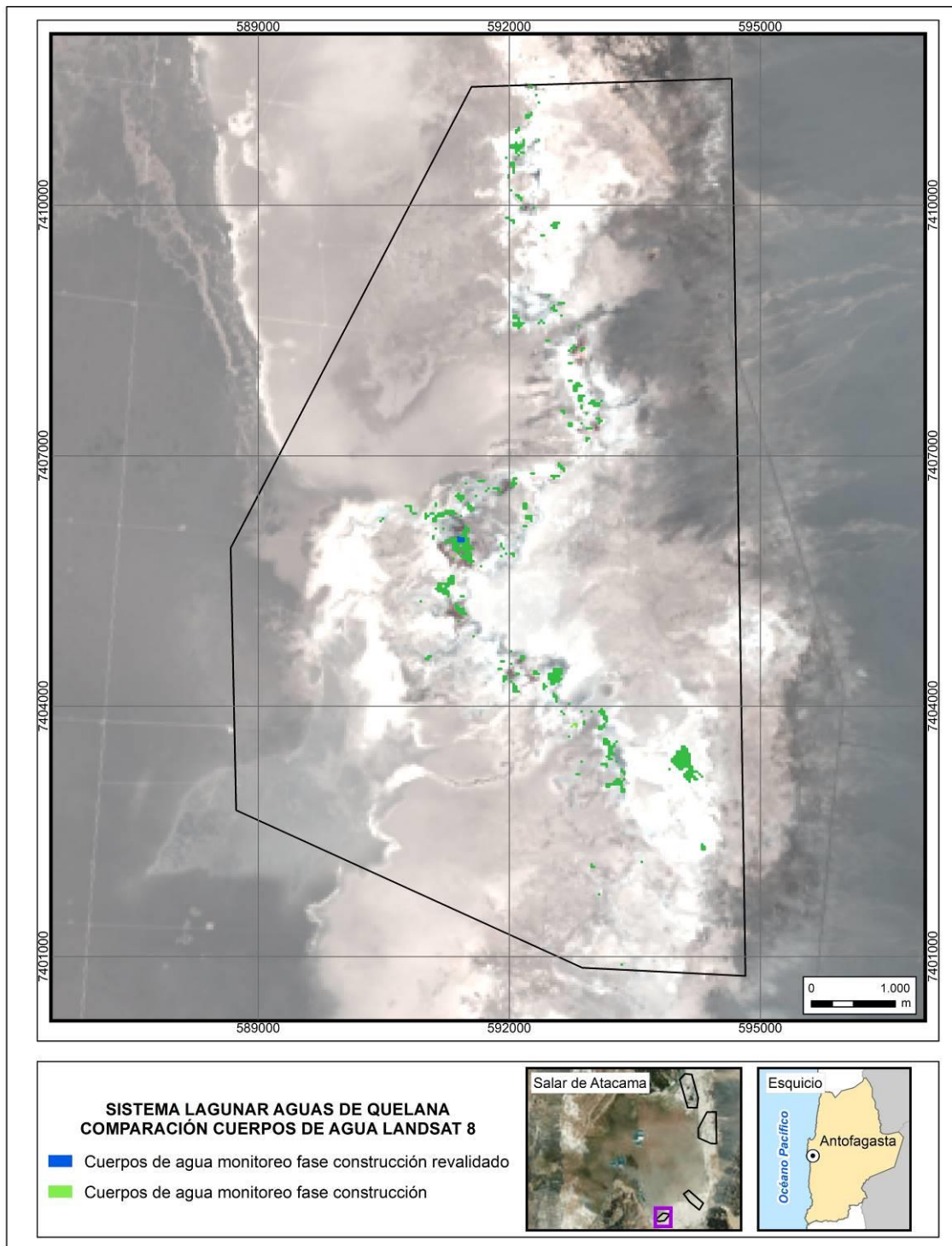
Metadata_Landsat 8.pdf

ANEXO 9-7. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Aguas de Quelana - imágenes Pleiades 1A.



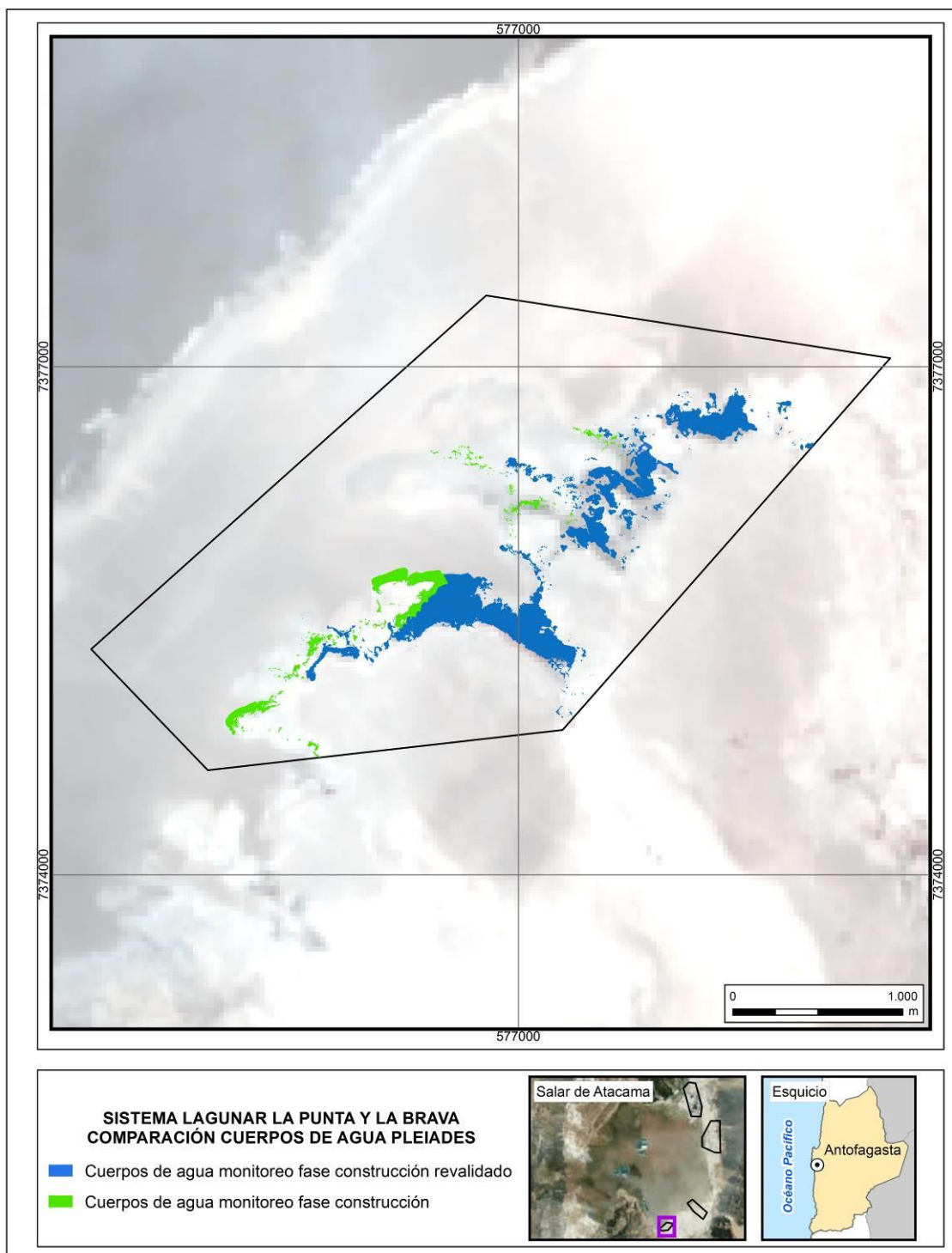
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-8. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Aguas de Quelana - imágenes Landsat 8.



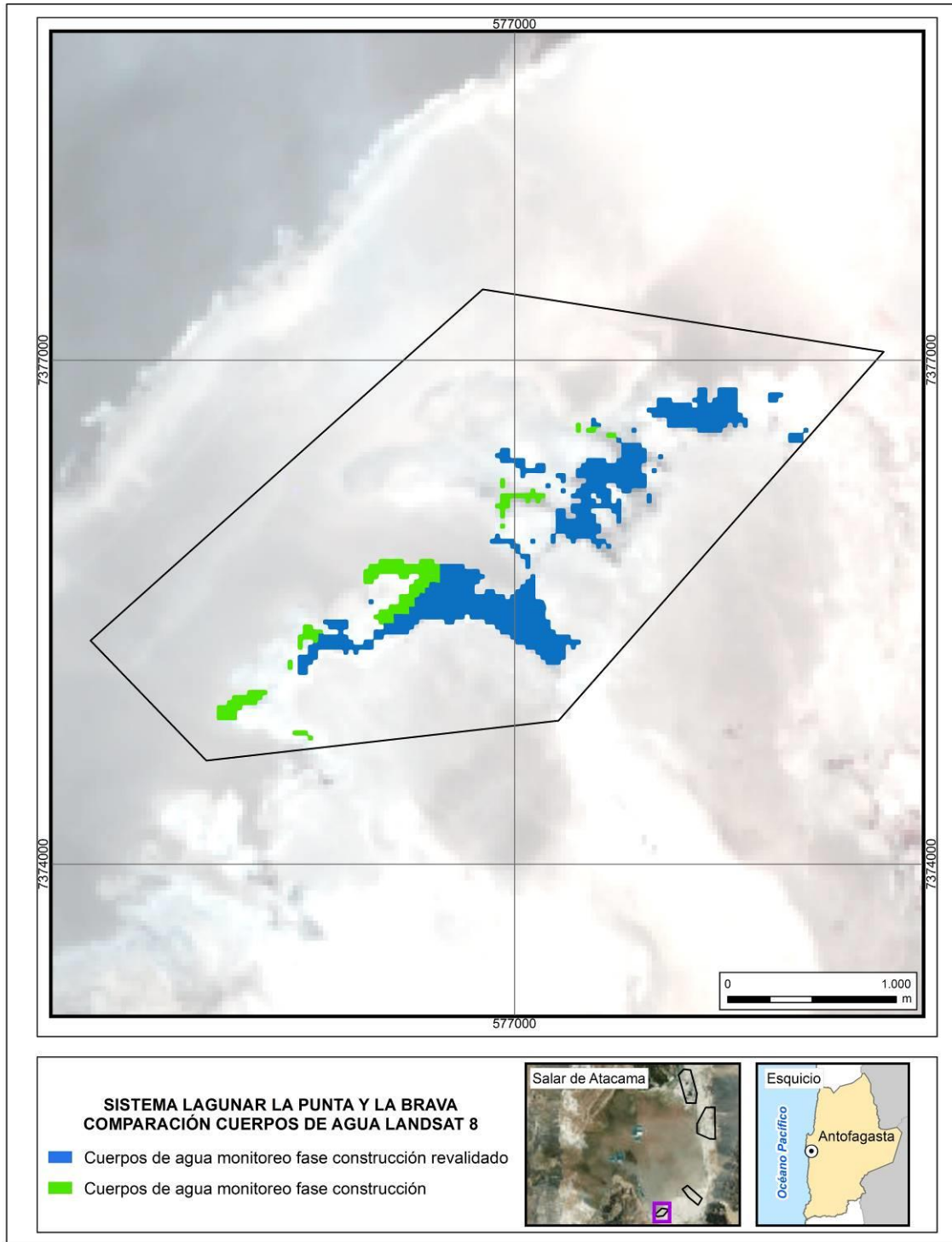
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-9. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar La Punta y La Brava - imágenes Pleiades 1A.



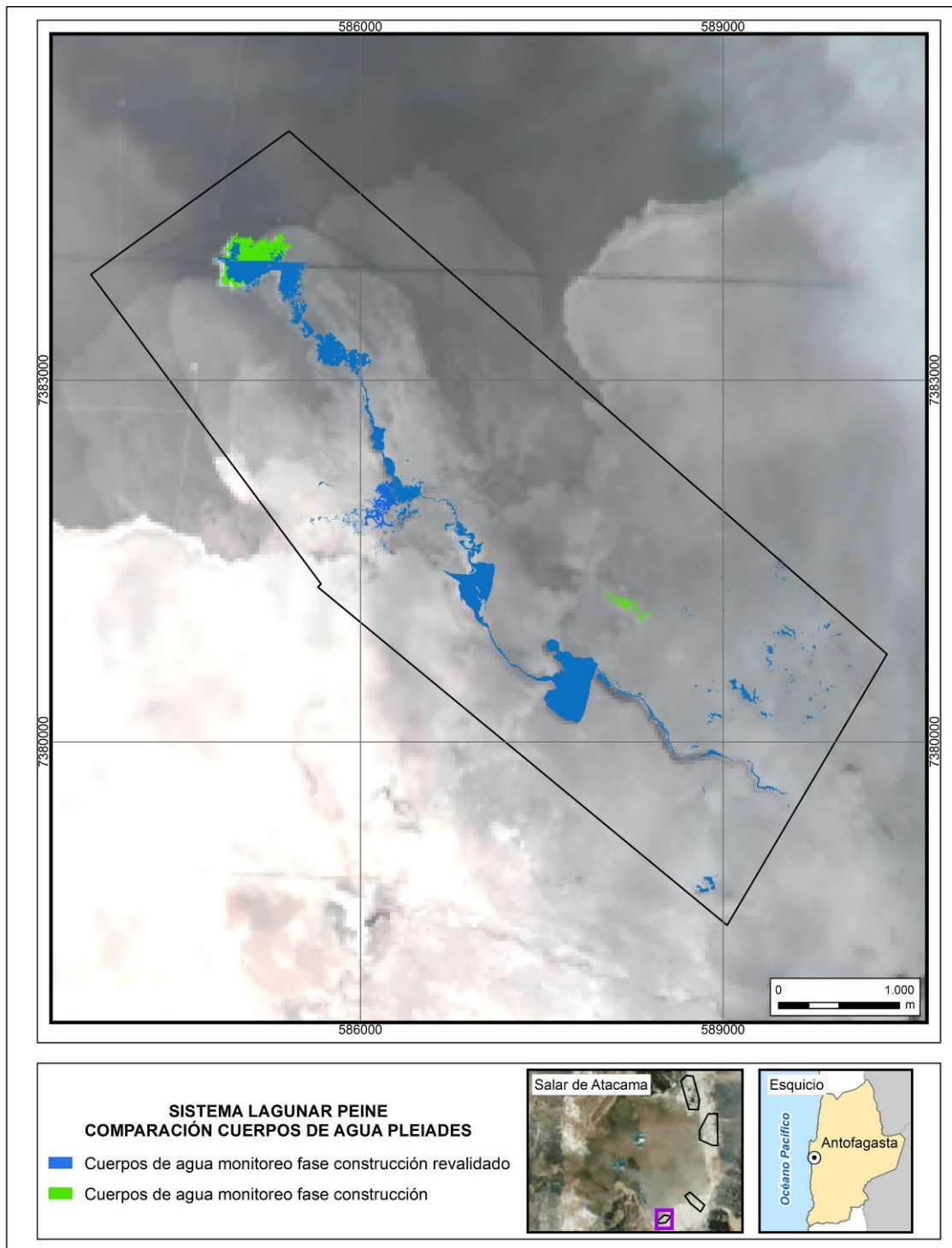
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-10. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar La Punta y La Brava - imágenes Landsat 8.



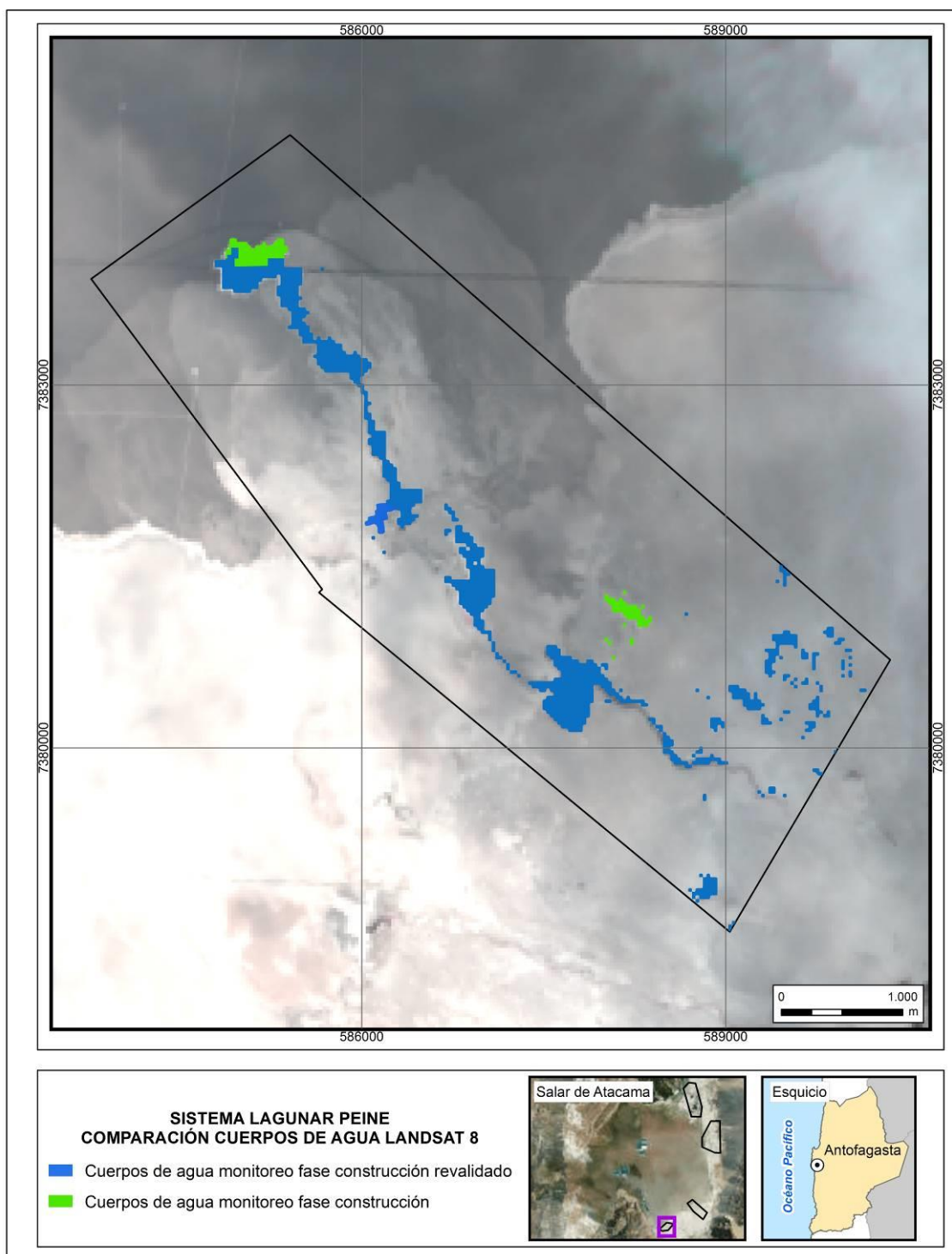
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-11. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Peine - imágenes Pleiades 1A.



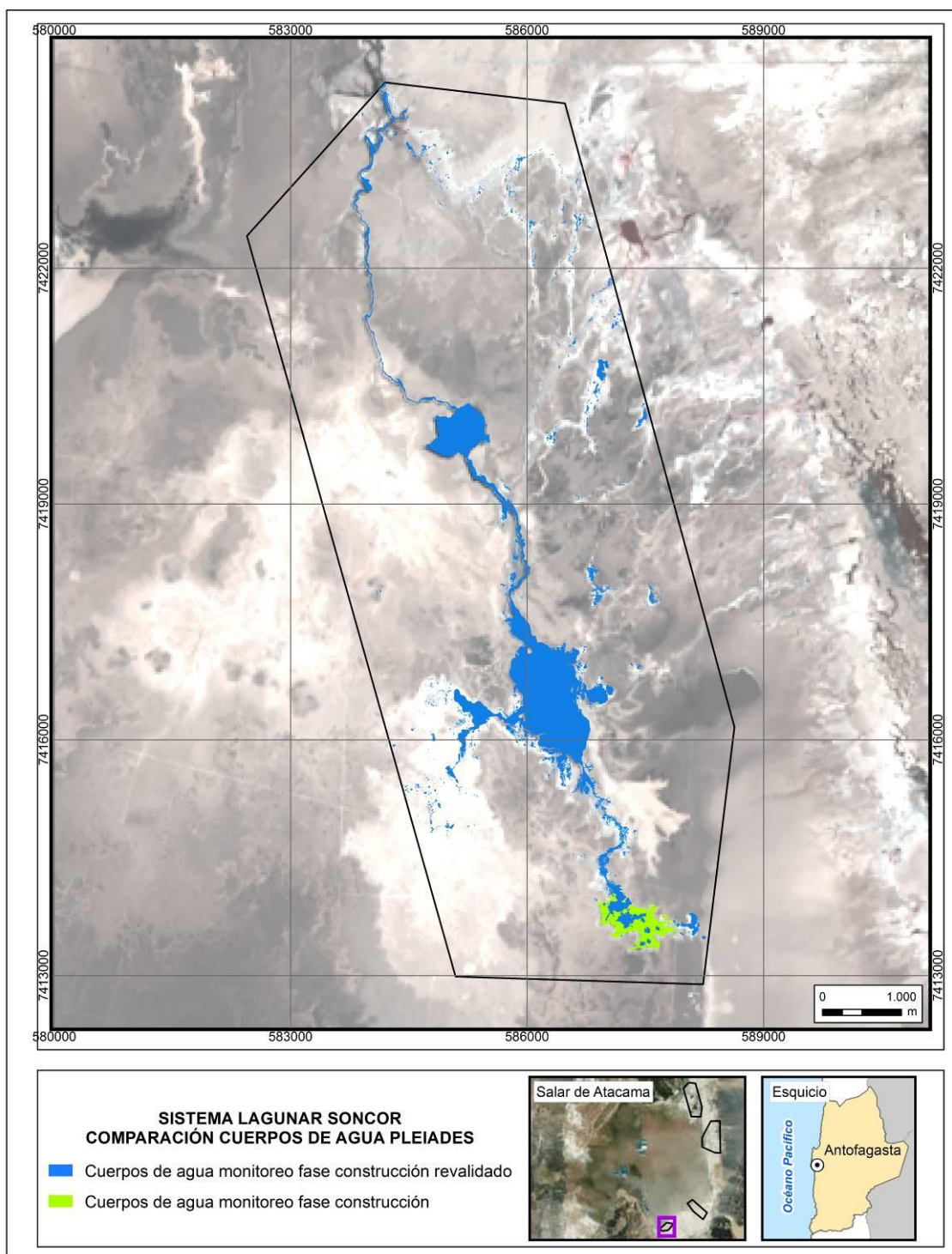
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-12. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Peine - imágenes Landsat 8.



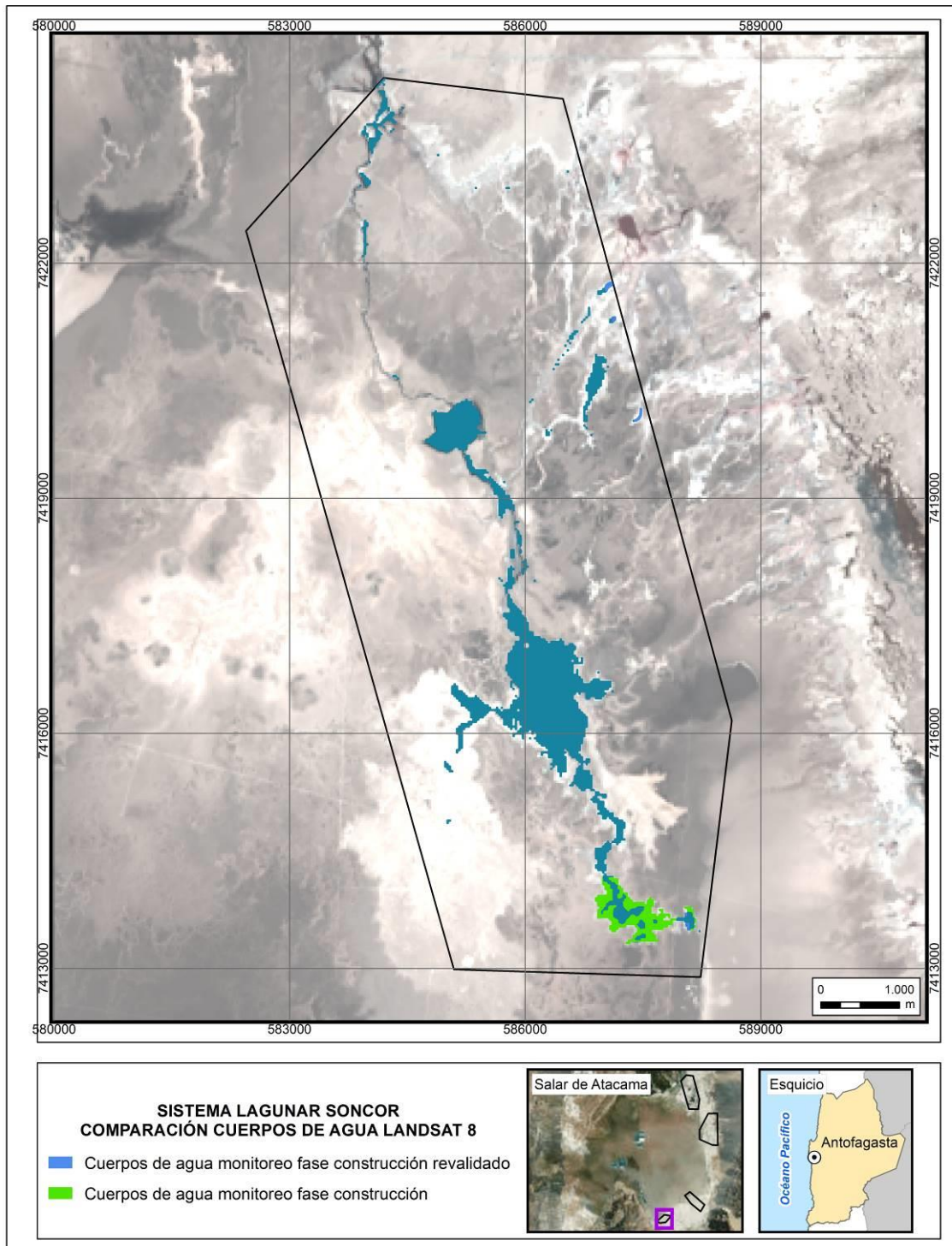
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-13. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Soncor - imágenes Pleiades 1A.



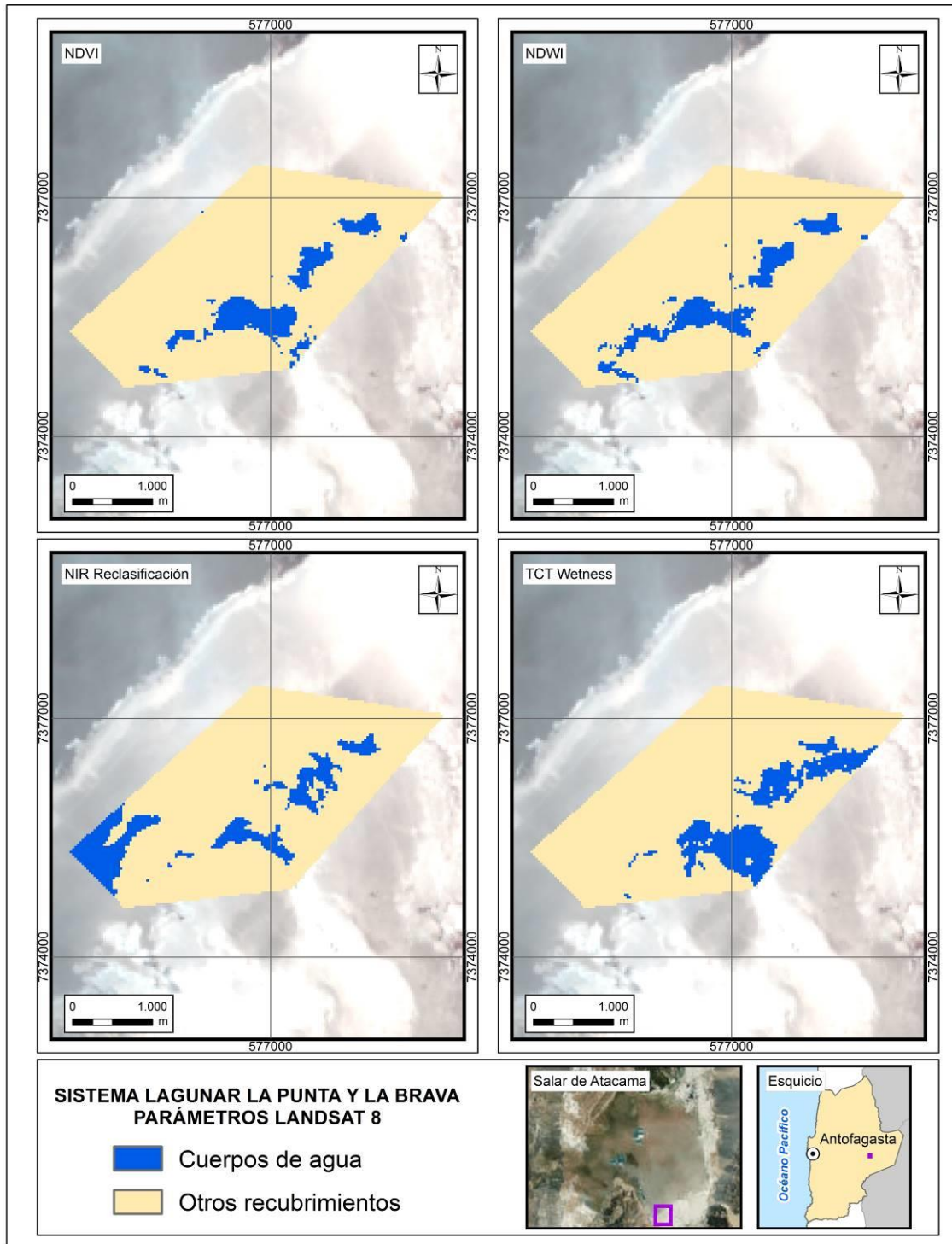
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-14. Variación en la cobertura de los cuerpos de agua de invierno 2016 por validación complementaria, sistema lagunar Soncor - imágenes Landsat 8.



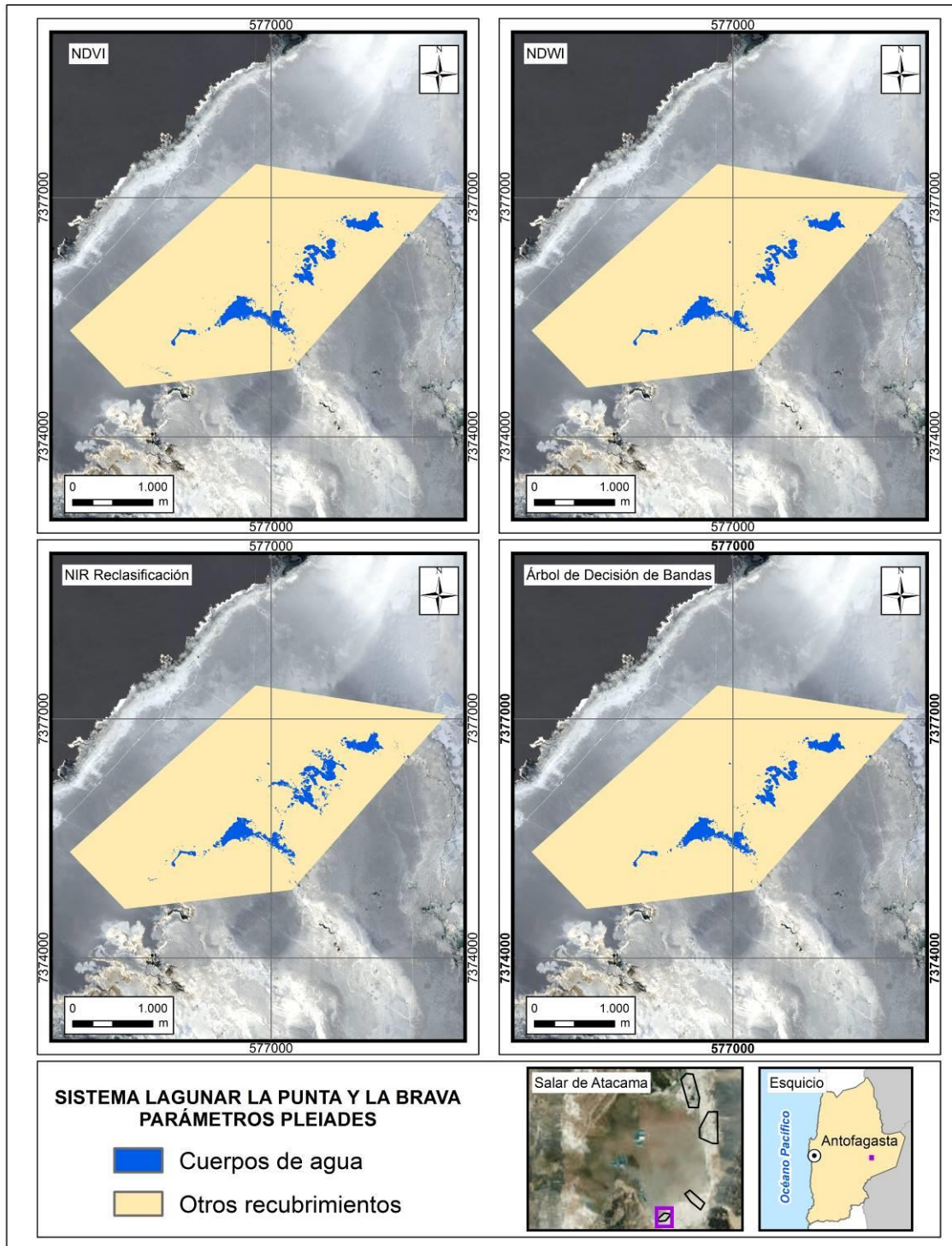
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-15. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes LANDSAT 8.



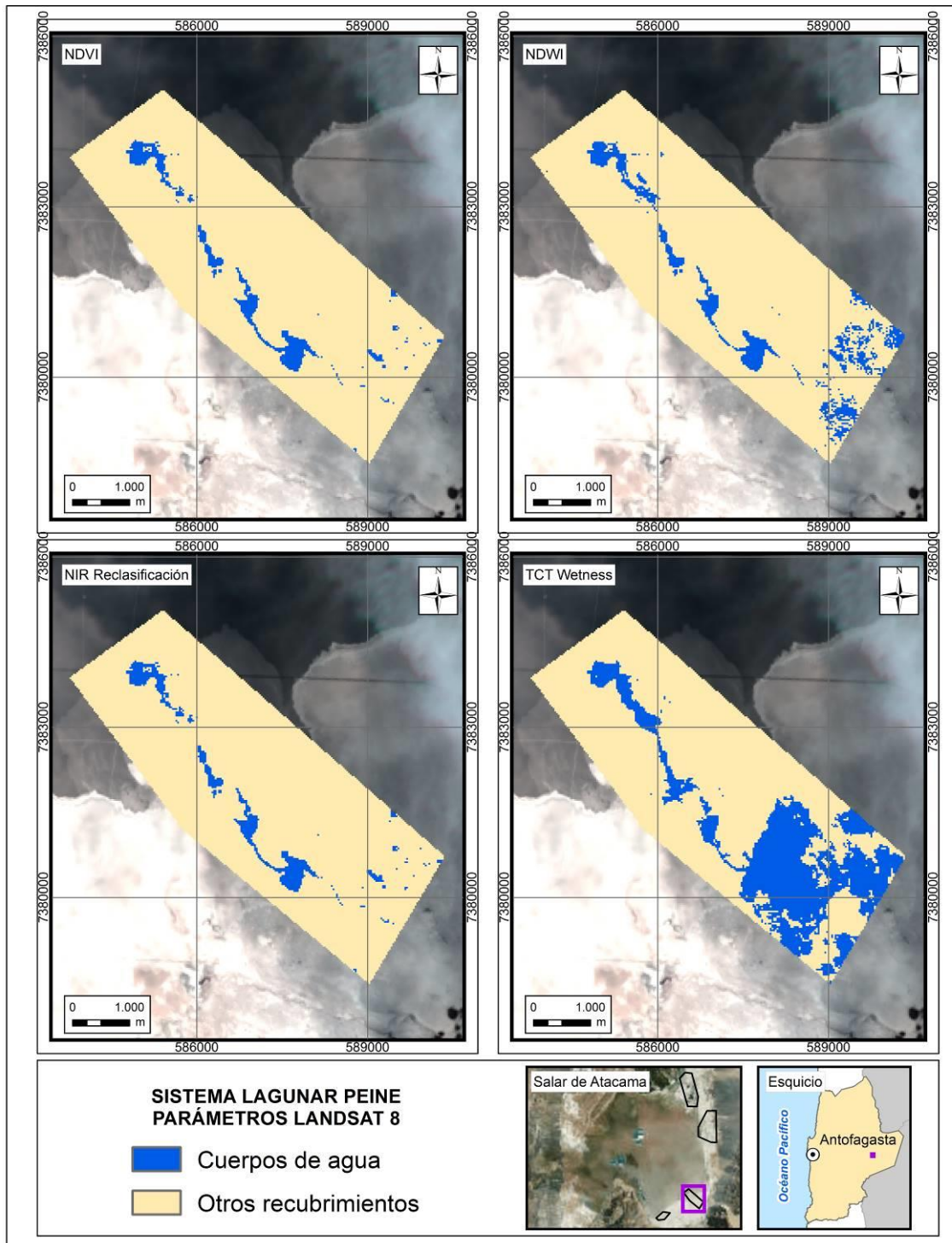
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-16. Parámetros espectrales para el sistema lagunar La Punta y La Brava, imágenes PLEIADES 1A.



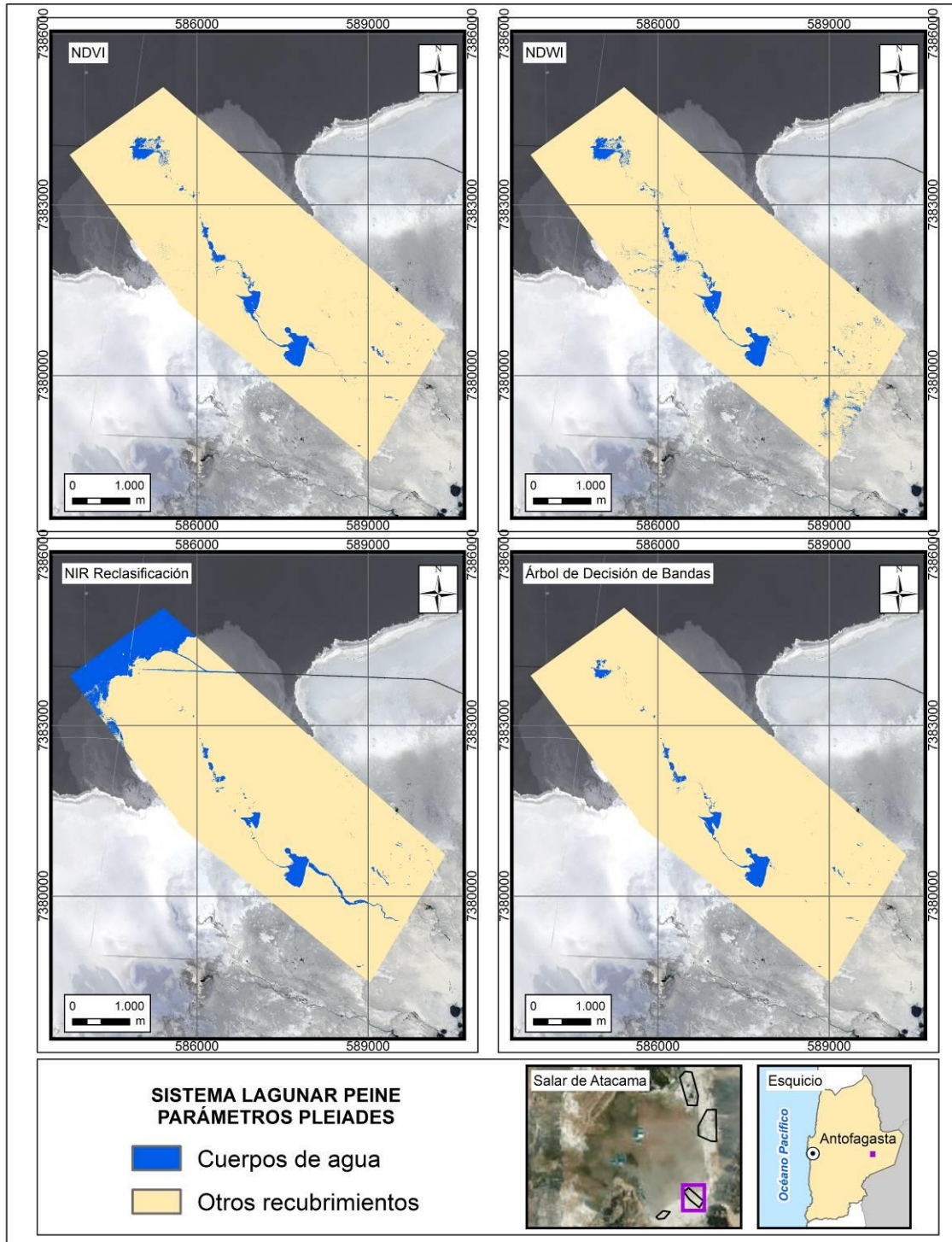
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-17. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes LANDSAT 8.



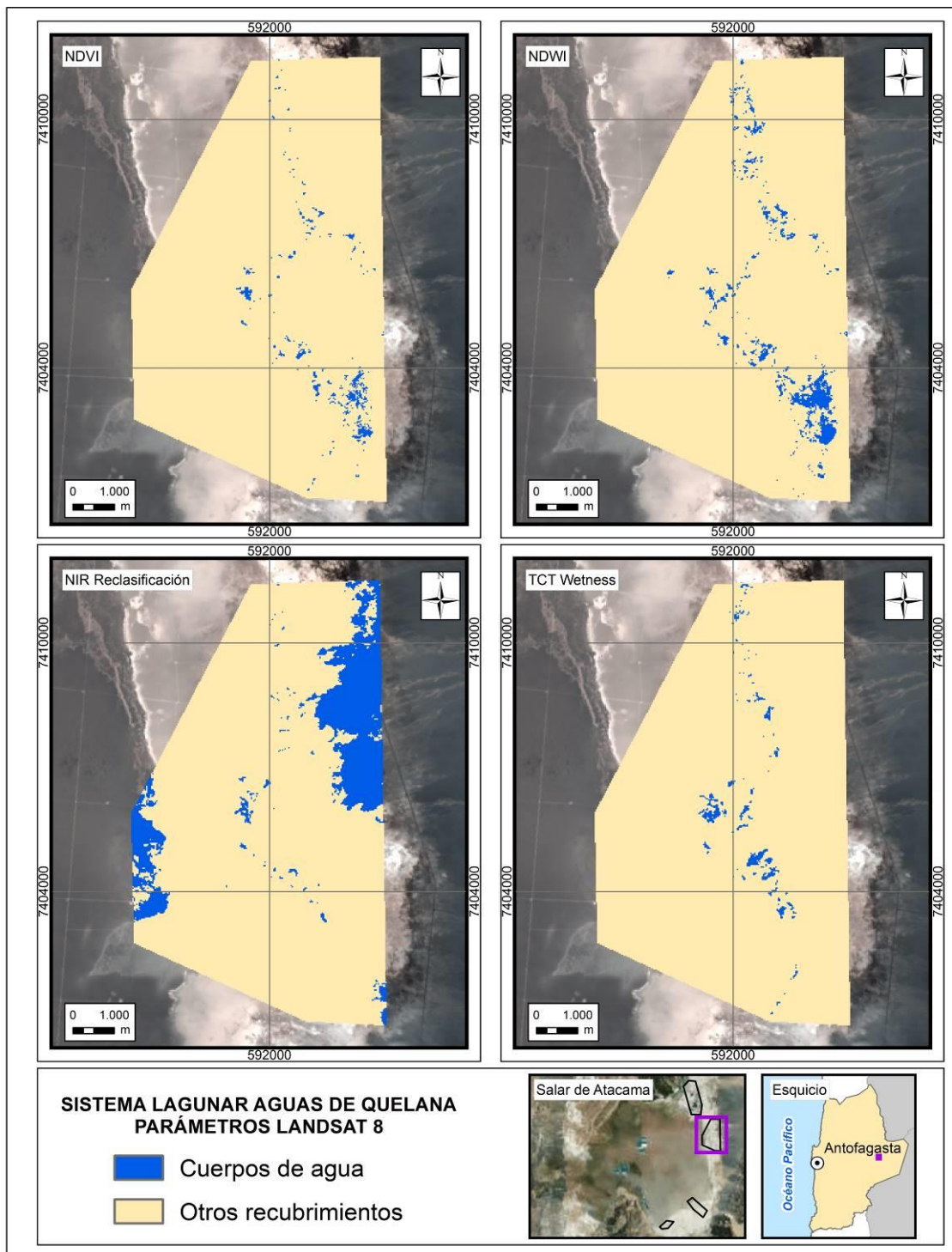
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-18. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Peine, imágenes PLEIADES 1A.



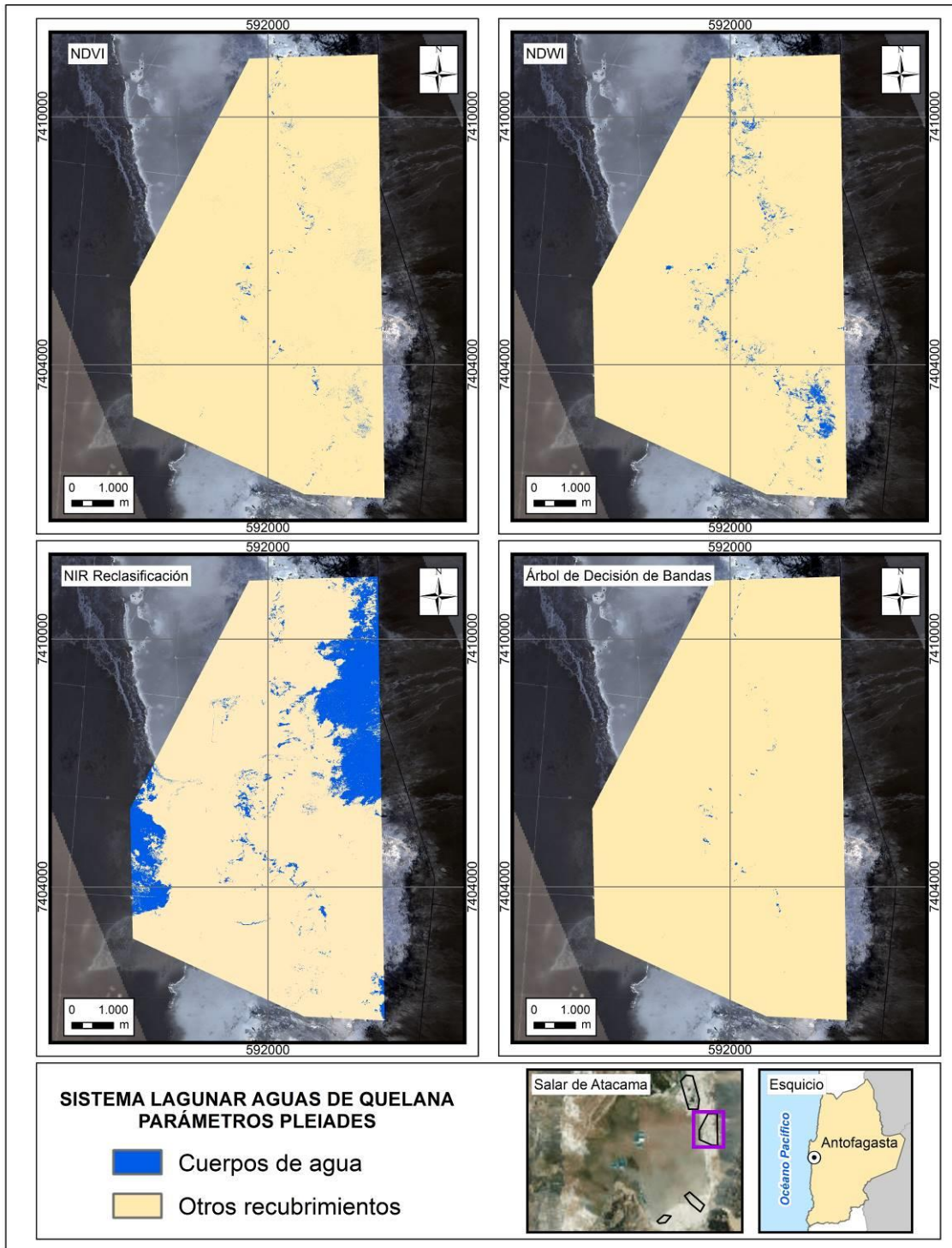
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-19. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes LANDSAT 8.



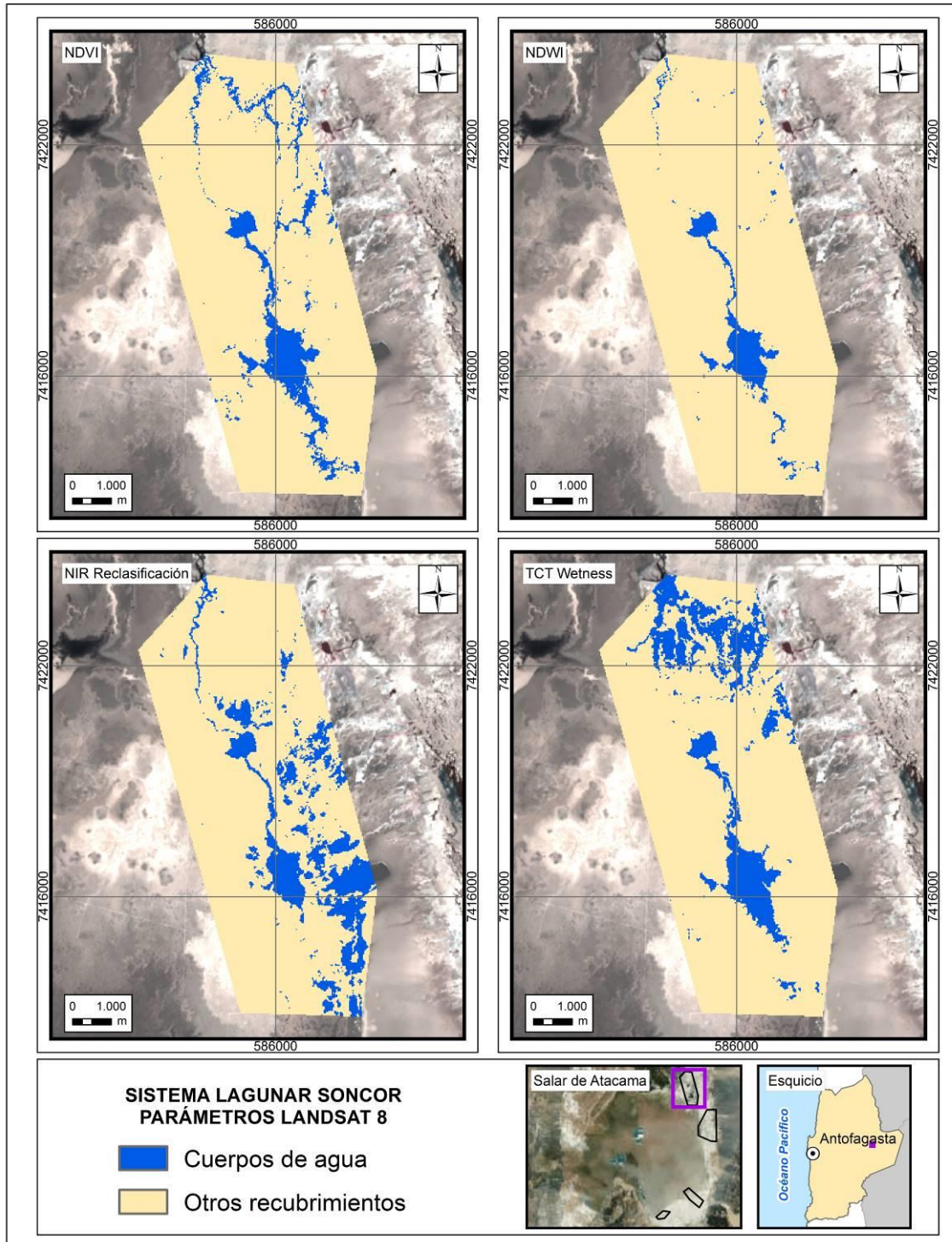
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-20. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Aguas de Quelana, imágenes PLEIADES 1A.



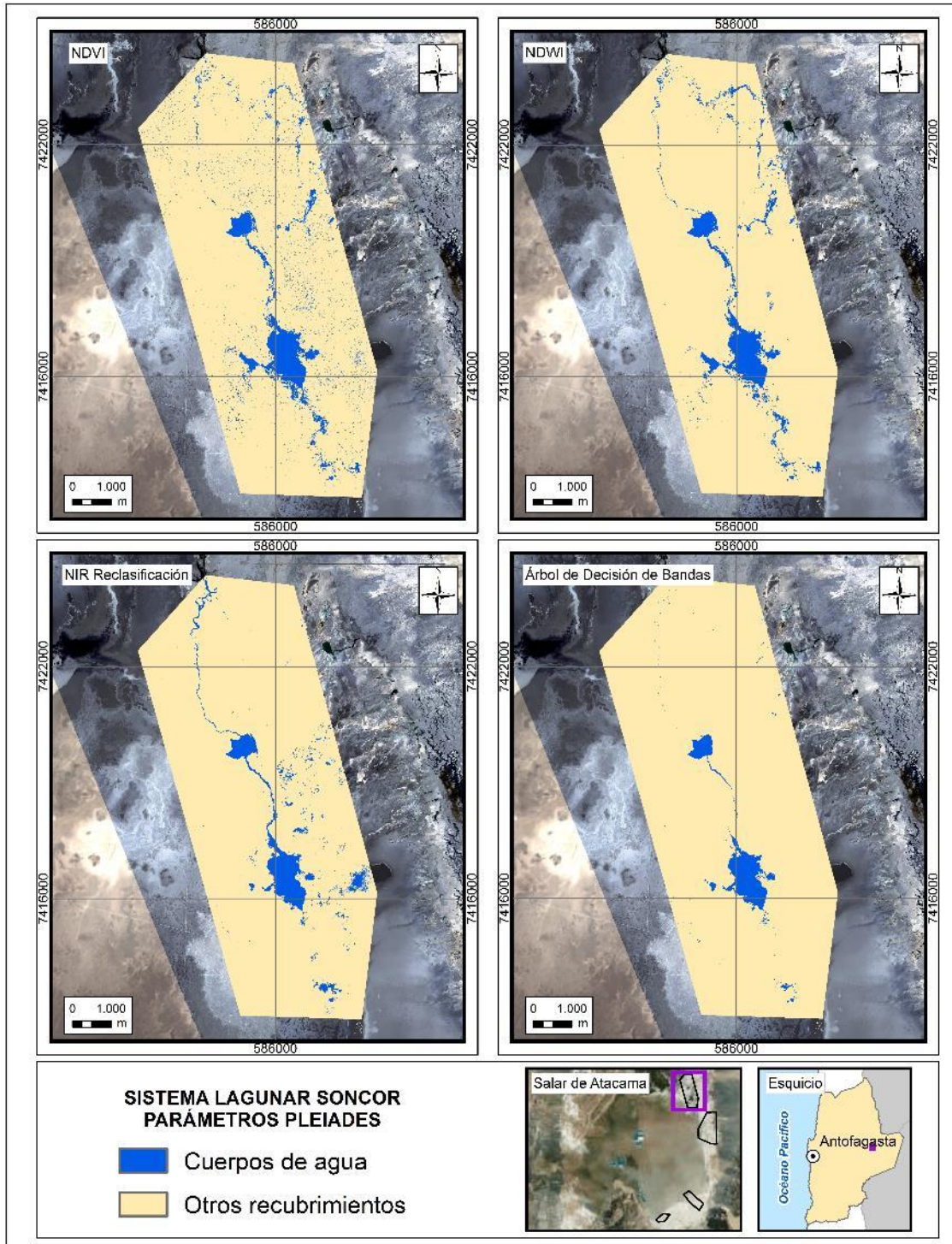
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-21. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes LANDSAT 8.



Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9-22. Parámetros espectrales para el sistema lagunar Soncor, imágenes PLEIADES 1A.



Fuente: Elaboración propia