



# **UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MULTITEMPORAL DE LAS LAGUNAS  
LA PUNTA Y LA BRAVA DEL SECTOR NEGRILLAR – TILOPOZO DEL SALAR  
DE ATACAMA**

**FRANCISCA ANDREA GALAZ MIRANDA**

**Santiago, Chile  
2022**



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MULTITEMPORAL DE LAS LAGUNAS  
LA PUNTA Y LA BRAVA DEL SECTOR NEGRILLAR – TILOPOZO DEL SALAR  
DE ATACAMA**

**MULTITEMPORAL BEHAVIOR STUDY OF “LA PUNTA” AND “LA BRAVA”  
LAGOONS IN NEGRILLAR – TILOPOZO SECTOR AT SALAR DE ATACAMA**

**FRANCISCA ANDREA GALAZ MIRANDA**

**Santiago, Chile  
2022**



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**Memoria de Título**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MULTITEMPORAL DE LAS LAGUNAS  
LA PUNTA Y LA BRAVA DEL SECTOR NEGRILLAR – TILOPOZO DEL SALAR  
DE ATACAMA**

Memoria para optar al título  
Profesional de Ingeniera en Recursos Naturales Renovables

**FRANCISCA ANDREA GALAZ MIRANDA**

	<b>Calificaciones</b>
<b>PROFESOR GUÍA</b> Sr. Manuel Paneque C. Bioquímico, Dr.	7,0
<b>PROFESORES EVALUADORES</b> Sr. Andrés De la Fuente Ingeniero Agrónomo, M.S.	6,8
Sr. Osvaldo Salazar G. Ingeniero Agrónomo, M.S. Ph. D.	6,5

**Santiago, Chile  
2022**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los agradecimientos de esta memoria van para aquellas y aquellos que estuvieron presentes, de una u otra forma, cuando el ánimo decaía y el final del camino se veía lejísimo, ya fuera con un té, un abrazo, una manzana o un ronroneo.

A los de siempre por las risas, el cariño y la contención. Sin ustedes, esto no se habría logrado.

A mi familia por la paciencia, la insistencia en terminar este proceso y nunca perder la fe.

A mi profesor guía y su equipo, por el tiempo, dedicación y consejos.

Y a toda la gente que estuvo de paso que, con su granito, contribuyó a cerrar este ciclo.

A mi mamá y a mi Negrito

## ÍNDICE

RESUMEN.....	8
“SUMMARY” .....	9
INTRODUCCIÓN .....	10
Objetivo General .....	13
MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
Enfoque metodológico .....	15
Determinación de áreas observadas del sistema lagunar La Punta y La Brava .....	16
Corrección radiométrica.....	17
Corrección atmosférica .....	18
Estimación del área del sistema lagunar La Punta y La Brava .....	20
Variación espacio-temporal del sistema lagunar para el período 1985-2019 .....	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	26
Determinación de áreas observadas del sistema lagunar La Punta y La Brava .....	26
Estimación del área del sistema lagunar La Punta y La Brava, mediante aplicación de umbral estándar y umbrales óptimos. Determinación del método con mejor desempeño.....	27
Serie temporal 1985-2019: Superficies sistema lagunar La Punta y La Brava.....	35
CONCLUSIONES .....	44
BIBLIOGRAFÍA .....	46
APÉNDICES.....	59
Apéndice 1. Datos imágenes satelitales Landsat utilizados en estudio multitemporal ....	59
Apéndice 2 a) Diferencia interanual entre áreas estimadas mediante el índice MNDWI_2 para el sistema lagunar La Punta – La Brava, período húmedo.....	61
Apéndice 2 b) Diferencia interanual entre áreas estimadas mediante el índice MNDWI_2 para el sistema lagunar La Punta – La Brava, período seco.....	62

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Número de banda y longitud de onda en GeoEye-1. ....	16
<b>Cuadro 2.</b> Coordenadas imágenes de alta resolución GeoEye-1. ....	17
<b>Cuadro 3.</b> Factores de ajuste de calibración imágenes GeoEye-1 .....	18
<b>Cuadro 4.</b> Irradiancia solar exoatmosférica según Kuester, 2017 para imágenes GeoEye-1 .....	18
<b>Cuadro 5.</b> Número de banda y longitud de onda en Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI.....	22
<b>Cuadro 6.</b> Índices espectrales considerados para la detección remota óptima de áreas acuáticas y no acuáticas .....	23
<b>Cuadro 7.</b> Algoritmos utilizados en el proceso de estimación de umbrales óptimos mediante ImageJ .....	24
<b>Cuadro 8.</b> Umbrales óptimos obtenidos a través de la aplicación del software ImageJ para los distintos índices espectrales para el período húmedo (marzo) y seco (septiembre) del año 2017.....	28
<b>Cuadro 9.</b> Áreas (ha) estimadas del espejo de agua mediante índices espectrales para el período húmedo (marzo) del año 2017, utilizando umbral estándar y umbrales óptimos. ...	28
<b>Cuadro 10.</b> Diferencia entre áreas observadas y áreas estimadas (ha) del espejo de agua, mediante índices espectrales, para el período húmedo, 2017, utilizando umbral estándar y umbrales óptimos. ....	29
<b>Cuadro 11.</b> Áreas (ha) estimadas del espejo de agua mediante índices espectrales para el período seco (septiembre) del año 2017, utilizando umbral estándar y umbrales óptimos. ....	30
<b>Cuadro 12.</b> Áreas estimadas del espejo de agua mediante índices espectrales para el período seco (septiembre) del año 2017, utilizando umbral estándar y umbrales óptimos.....	31
<b>Cuadro 13.</b> Umbral óptimo promedio estimado para Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI .....	35
<b>Cuadro 14.</b> Ecuación de la recta correspondiente a las líneas de tendencia de las series de tiempo para el período húmedo, período seco y promedio anual .....	38
<b>Cuadro 15.</b> Cambio en superficie del espejo de agua del sistema lagunar La Punta y La Brava para un ciclo de 5 años entre 1985-2019, periodo húmedo y seco. ....	40
<b>Cuadro 16.</b> Cambio en superficie del espejo de agua del sistema lagunar La Punta y La Brava para un ciclo de 10 años entre 1985-2019, periodo húmedo y seco. ....	40
<b>Cuadro 17.</b> Cambio en superficie del espejo de agua del sistema lagunar La Punta y La Brava para un ciclo de 15 años entre 1985-2019, periodo húmedo y seco. ....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Subsistema lagunar La Punta y la Brava, ubicado en el extremo sur del Salar de Atacama, región de Antofagasta, Chile.....	15
<b>Figura 2.</b> Esquema metodológico para determinar las variaciones del espejo de agua del subsistema lagunar La Punta y La Brava, entre los años 1985 y 2019. ....	16
<b>Figura 3.</b> Imágenes de alta resolución GeoEye-1 Lagunas La Punta y La Brava: A) mayo 2017 y B) septiembre 2017. ....	20
<b>Figura 4.</b> Delimitación de los cuerpos de agua del sistema laguna La Punta y La Brava, mediante fotointerpretación sobre imágenes GeoEye-1, para el año 2017. A) Período húmedo, en color azul (mayo) y B) Período seco, en color amarillo (septiembre).....	26
<b>Figura 5.</b> Áreas observadas en el periodo húmedo (mayo), en color azul, para el periodo seco (septiembre), en color amarillo, para el año 2017 en el sistema lagunar La Punta y La Brava. ....	27
<b>Figura 6.</b> Área estimada del sistema lagunar La Punta - La Brava. A) utilizando índices espectrales y umbral estándar (0) para el período húmedo, en el año 2017. B) utilizando índices espectrales y umbrales óptimos, y el método de clasificación no supervisada, para el período húmedo, en el año 2017. La línea roja indica el área observada (66,10 ha). ....	30
<b>Figura 7.</b> Áreas estimadas del sistema lagunar La Punta - La Brava. A) utilizando índices espectrales y umbral estándar (0) para el período seco, en el año 2017. B) utilizando índices espectrales y umbrales óptimos, y el método de clasificación no supervisada, para el período seco, en el año 2017. La línea roja indica el área observada (72,40 ha). ....	32
<b>Figura 8.</b> Sistema lagunar La Punta - La Brava, periodo húmedo, año 2017. Área observada, en color azul. Área estimada con el índice espectral MNDWI_2, en color verde. Área estimada con el índice espectral AWEInsh, en color rojo. ....	33
<b>Figura 9.</b> Sistema lagunar La Punta - La Brava, periodo seco, año 2017. Área observada, en color amarillo. Área estimada con el índice espectral MNDWI_2, en color verde. Área estimada con el índice espectral AWEInsh 2, en color rojo. ....	34
<b>Figura 10.</b> Serie temporal 1985 – 2019 del área estimada de la superficie cubierta con agua del sistema lagunar La Punta - La Brava, para el período húmedo, con índice espectral MNDWI_2. La línea roja de punto discontinuo muestra la tendencia lineal del comportamiento de la superficie inundada. ....	36
<b>Figura 11.</b> Serie temporal 1985 – 2019 del área estimada de la superficie cubierta con agua del sistema lagunar La Punta y La Brava, para el período seco, con índice espectral MNDWI_2. La línea roja de punto discontinuo muestra la tendencia lineal del comportamiento de la superficie inundada. ....	37
<b>Figura 12.</b> Serie temporal 1985 – 2019 del área estimada promedio anual de la superficie cubierta con agua del sistema lagunar La Punta y La Brava, con índice espectral MNDWI_2. La línea roja de punto discontinuo muestra la tendencia lineal del comportamiento de la superficie inundada. ....	38
<b>Figura 13.</b> Cambios interanuales en la superficie del espejo de agua (ha), estimados con el índice MNDWI_2, entre los años 1985 y 2019. A) Período húmedo (mayo) B) Período seco (septiembre) y C) Período anual (promedio). ....	39

**Figura 14.** Área estimada del sistema lagunar La Punta -La Brava, mediante el índice espectral MNDWI\_2, para el año 1985 (azul claro) y el año 2019 (azul fuerte), para el período húmedo..... 41

**Figura 15.** Área estimada del sistema lagunar La Punta - La Brava, mediante el índice espectral MNDWI\_2, para el año 1985 (amarillo) y el año 2019 (naranja), para el período seco..... 42

## RESUMEN

Las lagunas La Punta y La Brava, ubicadas al norte del sector Tilopozo, Salar de Atacama, Antofagasta, Chile; que junto a otros sistemas lagunares, constituyen un importante punto para la conservación de la biodiversidad. Estos cuerpos de agua están sujetos a constantes cambios en su superficie, producto de factores climáticos y posiblemente por la presión antrópica que se ejerce sobre ellos, principalmente por la gran industria. Con el fin de analizar la dinámica del espejo de agua en el tiempo y en el espacio, se emplearon herramientas de sensores remotos y sistemas de información geográfica. Mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales obtenidas para el período comprendido entre 1985 y 2019, se determinó que el área del espejo de agua presentó una disminución del 49,48% para el período húmedo y de un 57,96% para la época seca; atribuibles al comportamiento del clima y la extracción de salmuera. La aplicación de herramientas de sensores remotos y sistemas de información geográfica permitió una cuantificación precisa de los cambios espaciales y temporales que ha presentado la cobertura de las lagunas a lo largo del período de tiempo estudiado.

**Palabras clave:** Humedales, Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI, Índices Espectrales, Superficie Lagunar, Sistema Lagunar La Punta y La Brava, Teledetección.

## “SUMMARY”

The La Punta and La Brava lagoons, located north of the Tilopozo sector at Salar de Atacama, Antofagasta, Chile; that together with other lagoon systems, constitute an important point for the conservation of biodiversity. These bodies of water are subject to constant changes in their surface, as a result of climatic factors and possibly due to the anthropic pressure that is exerted on them, mainly due to large-scale industry. In order to analyze the dynamics of the water mirror in time and space, remote sensing tools and geographic information systems were used. Through the multi-temporal analysis of satellite images obtained for the period between 1985 and 2019, it was determined that the area of the water mirror presented a decrease of 49,48% for the wet season and 57,96% for the dry season; attributable to the behavior of the climate and the extraction of brine. The application of remote sensing tools and geographic information systems allowed a precise quantification of the spatial and temporal changes that the coverage of the lagoons has presented throughout the period of time studied.

**Key words:** Wetlands, Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI, Spectral Indices, Lagoon Surface, “La Punta” and “La Brava” Lagoon System, Remote Sensing.

## INTRODUCCIÓN

Los cambios en la cobertura de los ecosistemas afectan directamente a sistemas físicos, biológicos y antrópicos (Duarte, 2006; Alaniz, 2014; Uribe, 2015). Estos cambios se han visto reflejados en la disminución del volumen de las principales fuentes de agua dulce del planeta, tales como glaciares y humedales (Zeballos *et al.*, 2014). En zonas de climas extremos, factores ambientales como el aumento de temperatura media anual y cambios en el régimen e intensidad de las precipitaciones, están asociados principalmente a los efectos del cambio climático (Brown *et al.*, 2015). Además, actividades antrópicas como la agricultura, el pastoreo, la minería, cambio en los usos del suelo, el desvío de cauces, y la sobreexplotación de recursos hídricos, potencian, directa e indirectamente, la reducción superficial de los ecosistemas biológicos (Ministerio de Medio Ambiente, 2011; Vargas, 2011; Valencia y Figueroa, 2015; Palacios y Escobar, 2016).

Los humedales, se encuentran entre los ecosistemas más susceptibles a las alteraciones del clima, y son definidos como puntos clave, no solo por su rol vital para la biodiversidad sino también por la importancia que estos tienen para el desarrollo de las comunidades humanas (Barrera, 2011; Tan *et al.*, 2022), incluyendo a los subsistemas límnicos integrados a la cuenca como los pantanos, marismas, lagos, bofedales, salares, pastizales húmedos, turberas y estuarios (Marín *et al.*, 2006; Ministerio de Medio Ambiente, 2011). Estos sistemas naturales presentan estructuras complejas, y son altamente vulnerables a las dinámicas hidrológicas, ecológicas, culturales y socioeconómicas de las regiones donde están inmersos (Costanza *et al.*, 2014; Aponte, 2018; Li *et al.*, 2020). Además, este tipo de ecosistema ha sido progresivamente deteriorado por el cambio climático y las presiones antrópicas (Valencia y Figueroa, 2015; Dixon *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2020).

El Salar de Atacama es el mayor depósito salino de Chile ubicado en la región de Antofagasta (Dirección General de Aguas, 2004). Este ecosistema destaca por su biodiversidad y su flora y fauna adaptada a condiciones extremas, asociadas a las altas concentraciones de sales en sus lagunas y suelos, precipitaciones concentradas en la época estival y clima extremadamente seco el resto del año (Muñoz *et al.*, 2004; Ministerio de Medio Ambiente, 2015). Entre las actividades humanas que destacan dentro de la cuenca del Salar de Atacama se encuentra el pastoreo, la agricultura y la obtención de agua, realizadas principalmente por pueblos originarios (Bolados *et al.*, 2014; Bolados y Babidge, 2017). En paralelo, la principal actividad económica en esta cuenca es la minería; que en las zonas altas se manifiesta en la extracción de metales como el cobre, y en el salar mismo, destaca la extracción de litio por parte de empresas como Sociedad Química y Minera de Chile (Benavides y Sinclair, 2014; Bravo, 2021), y Rockwood-Albemarle (Romero *et al.*, 2017; Gundermann y Göbel, 2018).

La extracción industrial de agua, para procesos mineros, así como los efectos del cambio climático han provocado la sobreexplotación de los recursos hídricos. Esto ha derivado en conflictos con las comunidades locales, por la escasez de agua, así como el deterioro de los ecosistemas (Ministerio de Medio Ambiente, 2011; Bolados *et al.*, 2014; Gundermann y

Göbel, 2018), y la reducción de la superficie de los humedales (Romero *et al.*, 2017; Aponte, 2018; Soto *et al.*, 2019). Por esto, es fundamental generar información sobre el comportamiento multitemporal de la dinámica superficial de los humedales altoandinos, en particular de sus columnas de agua libre, lo cual permite tomar decisiones oportunas y evitar la pérdida de ecosistemas sensibles y únicos.

Por su parte, la exploración de la superficie terrestre basada en plataformas satelitales tiene como principio fundamental la captura de información de las distintas coberturas de la Tierra en formatos de imágenes, las cuales son una representación visual de la información capturada por sensores, los que se encuentran montados sobre un satélite artificial (Toro y Melo, 2009; Martínez y Pinto, 2018). Los sensores remotos son sistemas o instrumentos empleados en la recolección de información de manera rápida y viable, ya sea de un objeto, área o fenómeno a grandes distancias (Veneros *et al.*, 2020). La información obtenida es procesada e interpretada a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para comprender de mejor manera lo extraído (Martínez y Pinto, 2018). Los sensores remotos registran la energía electromagnética que es emitida o reflejada por la superficie de un objeto o área en las distintas bandas del espectro electromagnético (Veneros *et al.*, 2020).

El uso de imágenes satelitales es una fuente primaria de información (Cabello, 2008), y facilita la realización de análisis multitemporales de componentes ambientales como: el análisis de cobertura de suelo (Ponce, 2010; Sanabria *et al.*, 2010; Bedoya, 2015), temperatura (Parra *et al.*, 2006; Yarad, 2018) y componentes del agua (Aguirre, 2015; Sarp y Ozcelik, 2017; Aponte, 2018), evaluación de impactos ambientales (Merino, 1996; Santana *et al.*, 2010; Bremer *et al.*, 2015) y predicción meteorológica (Roa, 2007; Cazenave y Vives, 2014), entre otros. Dentro de las ventajas del uso de imágenes satelitales destacan la facilidad y rapidez para acceder a datos espaciales de lugares inaccesibles y extensos, haciendo de la percepción remota una herramienta útil para la identificación de elementos de la superficie terrestre (Ozesmi y Bauer, 2002; Aponte, 2018).

Existen diferentes métodos para identificar humedales y sus columnas de agua libre a partir de imágenes satelitales, y dentro de los más utilizados se encuentra el uso de índices espectrales, obtenidos a partir de imágenes satelitales como Landsat 5 Thematic Mapper (Landsat 5 TM) o Landsat 8 Operational Land Imager (Landsat 8 OLI; Otto *et al.*, 2011; García y Otto, 2015; Sarp y Ozcelik, 2017; Ge *et al.*, 2020). Destacan el índice de diferencia normalizado de vegetación (NDVI; Rouse *et al.*, 1974), índice de diferencia normalizado de agua (NDWI; McFeeters, 1996), índice de diferencia normalizado de agua modificado (MNDWI; Xu, 2006; Ko *et al.*, 2015) e índice automatizado de extracción de agua (AWEI; Feyisa *et al.*, 2014), los que generan resultados óptimos de evaluación (Aponte, 2018). También se han empleado métodos de clasificación supervisada y no supervisada, para el análisis de coberturas (Chuvienco, 2008).

Se han realizado estudios de monitoreo, detección e identificación de humedales con columnas de agua libre mediante el uso de teledetección, a través de la aplicación de índices espectrales en imágenes satelitales (Jara, 2022). García y Otto (2015) emplearon el NDVI para realizar la caracterización de humedales altoandinos ubicados en la cuenca del río Santa

en Perú, utilizando imágenes Landsat y contrastando período húmedo del período seco, delimitando el tipo de cuerpos de agua. Por su parte, Aponte (2018) y, Aponte y Ospina (2019) evaluaron el desempeño de índices espectrales utilizados para evaluar coberturas asociadas a humedales en imágenes Landsat TM y OLI, y mediante pruebas estadísticas, determinaron que el índice *tasseled cap greeness* (TCG), fue el de mejor rendimiento para detectar coberturas asociadas a humedales (vegetación, suelo y agua) y concluyeron que el peor evaluado fue el NDVI (Crist *et al.*, 1985; Huete, 1988). En contraparte, Sarp y Ozcelik (2017) realizaron un análisis multitemporal para la detección de cambios de un lago en Turquía, empleando los índices espectrales de agua AWEI, MNDWI y NDWI, en imágenes Landsat 5 TM y 8 OLI y un algoritmo de máquinas de vectores soporte o SVM; detectando que el índice NDWI obtuvo el mejor rendimiento para estimar la superficie del cuerpo de agua en estudio. Por su parte, Acharya *et al* (2019) utilizaron los índices espectrales NDVI, NDWI, MNDWI y AWEI, sobre imágenes Landsat 8 OLI, para delimitar cuerpos de agua presentes en Nepal, donde se aplicó primeramente el umbral estándar (0) de separación de cobertura de agua y no agua, y luego estimaron umbrales óptimos para cada índice.

En Chile, Oyola (2009), utilizando técnicas geomáticas en imágenes Landsat y Quickbird, identificó humedales en el norte del país. Las imágenes Quickbird, de alta resolución, fueron empleadas como realidad-terreno para validar los resultados obtenidos, luego de aplicar los índices NDVI, NDWI y TCG, y clasificaciones supervisadas y no supervisadas. Espinosa *et al* (2011) realizaron un análisis multitemporal de los cambios ocurridos entre 1984 y 2011, en 264 humedales, ubicados en el norte de Chile, utilizando imágenes ASTER y aplicando el NDVI. Sus resultados indican que, en la mayoría de los humedales estudiados, hubo pérdida de vegetación y disminución en los cuerpos de agua en los últimos años.

Los humedales presentes en el Salar de Atacama tienen importancia multisectorial y son monitoreados, principalmente, por la gran industria, que utiliza las aguas subterráneas de este sistema natural para realizar sus operaciones (Servicio de Evaluación Ambiental, 2014). La metodología utilizada para estimar las variaciones en el espejo de agua de las lagunas se basa principalmente en la aplicación de índices espectrales, como NDVI y NDWI, en imágenes satelitales de mediana resolución como Landsat y de alta resolución como Quickbird-2, Worldview-2 y GeoEye-1 (Dirección General de Aguas, 2014a; Soluciones en Gestión Ambiental, 2015). Además, se considera el agua somera y profunda para determinar el área de las distintas lagunas (Dirección General de Aguas, 2014a; Dirección General de Aguas, 2014b).

En el presente estudio se realizará un análisis multitemporal del sistema lagunar La Punta - La Brava ubicado en el sector sur de la cuenca del salar de Atacama. La información generada aportará a los estudios de humedales altoandinos, a su conservación y a la toma de decisiones informada con respecto a este tipo de ecosistemas.

## **Objetivo General**

Estimar el comportamiento multitemporal de las lagunas La Punta y La Brava en el sector Negrillar-Tilopozo del salar de Atacama entre los años 1985-2019.

## MATERIALES Y MÉTODOS

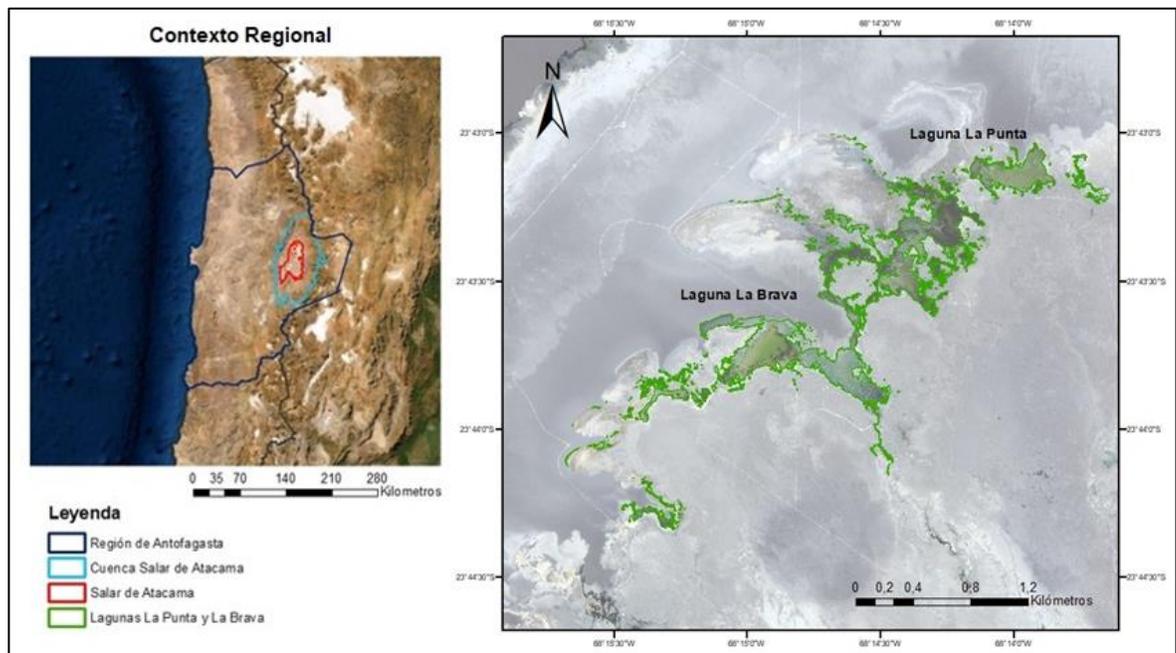
### Área de estudio

La cuenca del salar de Atacama, se encuentra en la región de Antofagasta, aproximadamente a 150 kilómetros al sureste de la ciudad de Calama, entre los 22°57' y 23°47' latitud sur (Muñoz *et al.*, 2004). Es una cuenca endorreica, que limita por el este con la Cordillera de los Andes y por el oeste con la Cordillera de Domeyko (Cornellà *et al.*, 2009). El fondo de la cuenca de Atacama está ocupado por el salar propiamente tal, donde subsisten algunas lagunas remanentes. La extensión húmeda alcanza aproximadamente los 1.500 km<sup>2</sup>, y representa un 10% de la superficie total, con una altitud media de 2.400 m.s.n.m. (Muñoz *et al.*, 2004). En las cercanías del salar se encuentran las comunidades de San Pedro de Atacama al norte, y Toconao y Peine al sur (Ministerio de Obras Públicas, 2014).

El clima de la cuenca del salar de Atacama es desértico marginal de altura (Gestión Ambiental Consultores, 2009), y tiene temperatura media anual que bordea los 10 °C y las precipitaciones anuales fluctúan entre 25 mm en el salar y 30 mm en la cordillera, concentrándose en la época estival, en los meses de diciembre a marzo, debido a la influencia del invierno boliviano (Romero *et al.*, 2013; Ministerio de Medio Ambiente, 2015; Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos, 2016). Las formaciones vegetacionales dominantes son del tipo desértica o de estepa, destacando especies como el algarrobo, llareta y tamarugo, entre otras (Luebert y Plissock, 2006).

El presente estudio se enmarca en el subsistema Lagunar La Punta – La Brava (Figura 1), situado en la zona sur del salar de Atacama (Comité de Minería No Metálica, 2018). Este sistema lagunar se considera poco profundo y salino (Núñez *et al.*, 2020), se encuentran a 2.300 m.s.n.m (Ahumada, 2014), y de forma paralela a la posición de interfase entre la salmuera y el agua dulce-salobre de la zona (Comité de Minería No Metálica, 2018). Presentan una serie de subcuerpos de aguas oscilantes (temporales) que eventualmente pueden separarse o unirse en función de la estación y condición de precipitación de cada año, caracterizando su alto grado de variabilidad anual e intra-anual (Colburn, 2008; Harris, 2008; Melak, 2008; Núñez *et al.*, 2020).

Es un sistema freatogénico de descarga, esto significa que depende en parte del vertido del acuífero Monturaqui–Negrillar–Tilopozo (cercano a la superficie), el empuje de una cuña salina desde el núcleo del Salar, así como aportes de subcuencas desde el sur (Anderson *et al.*, 2002; Marzuela *et al.*, 2020; Núñez *et al.*, 2020). Adicionalmente, el sistema responde a aportes superficiales (temporales, al existir precipitaciones intensas). La principal descarga natural se debe a la alta tasa de evaporación (Soto *et al.*, 2019; Núñez *et al.*, 2020).

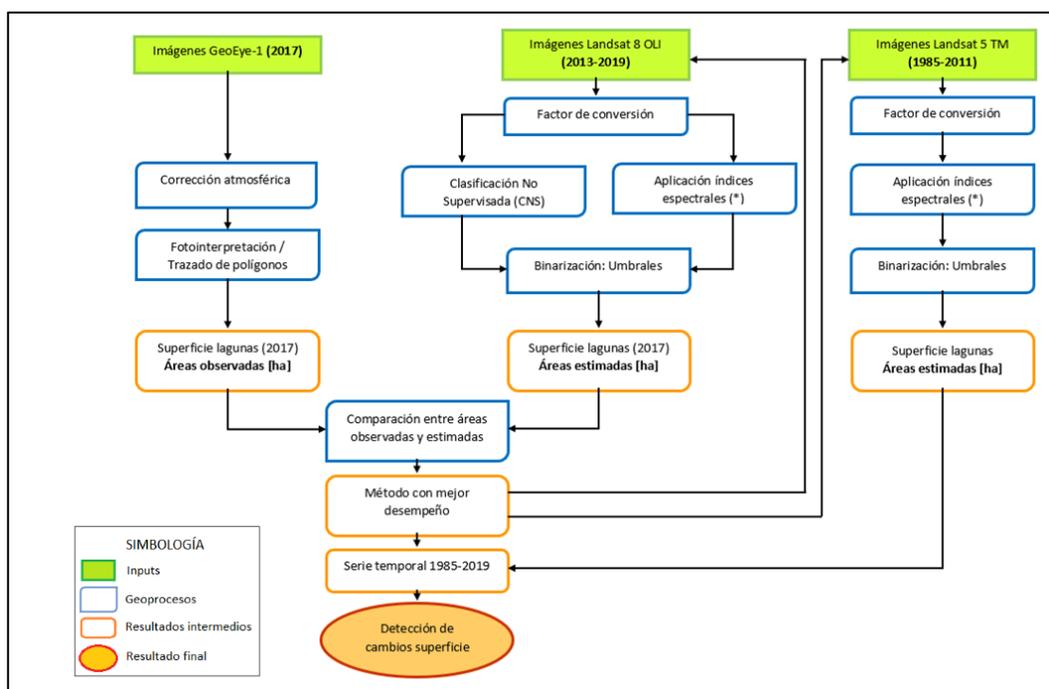


**Figura 1.** Subsistema lagunar La Punta y la Brava, ubicado en el extremo sur del Salar de Atacama, región de Antofagasta, Chile.

El sistema lagunar La Punta y La Brava tiene una alta tasa de evaporación, que contribuye a la reducción del cuerpo de agua, incluso en la desaparición de este y de las tierras inundadas que se encuentran próximas a las lagunas (Soto *et al.*, 2019; Núñez *et al.*, 2020). El período de evaporación es mayor a principios del verano, antes del período de precipitación, el que generalmente ocurre en el mes de marzo (Núñez *et al.*, 2020).

### Enfoque metodológico

Se estimó la superficie en hectáreas (ha) del subsistema lagunar La Punta y La Brava, entre los años 1985 y 2019, tanto para la época húmeda (marzo) como para la época seca (septiembre). Se utilizaron imágenes satelitales Landsat y GeoEye-1, de mediana y alta resolución, respectivamente, a las que se le aplicó el método de índices espectrales y una clasificación supervisada. Se utilizaron 68 imágenes en el análisis espacio – temporal, se seleccionó el método más apropiado para el área de estudio, y se estimaron las variaciones del espejo de agua a lo largo del tiempo. En la Figura 2 se resume el método empleado en este estudio.



**Figura 2.** Esquema metodológico para determinar las variaciones del espejo de agua del subsistema lagunar La Punta y La Brava, entre los años 1985 y 2019.

### Determinación de áreas observadas del sistema lagunar La Punta y La Brava

#### a) Procesamiento de imágenes satelitales GeoEye-1

Las imágenes de alta resolución GeoEye-1, contienen dos tipos de bandas, la pancromática (PAN), con una resolución espacial de 0,50 m y 4 bandas multispectrales (MS), cuya resolución es de 2,00 m. Estas bandas son azul, verde, rojo e infrarrojo cercano (Saldaña 2011; Randazzo *et al.*, 2020). En el Cuadro 1, se detallan las características de cada banda.

**Cuadro 1.** Número de banda y longitud de onda en GeoEye-1.

Banda	Nº Banda	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )
<b>Azul</b>	1	0.450 – 0.510
<b>Verde</b>	2	0.510 – 0.580
<b>Rojo</b>	3	0.655 – 0.690
<b>NIR</b>	4	0.780 – 0.920

En la Figura 3 se detalla el área cubierta por las imágenes de alta resolución GeoEye-1, y corresponde a los meses de mayo y septiembre de 2017. En el Cuadro 2 se resumen las coordenadas del punto central del sistema lagunar de las imágenes utilizadas en este estudio.

**Cuadro 2.** Coordenadas imágenes de alta resolución GeoEye-1.

Coordenadas UTM 19 S		
<b>Lagunas La Punta y La Brava</b>	ESTE	NORTE
	577.151 m	7.375.734 m

Las imágenes provenientes del satélite GeoEye-1 tienen distintos niveles de procesamiento, clasificándose en Geo, Geo Professional Precision e Imágenes de archivo (GeoEye, 2011; Saldaña, 2011; Venini, 2012). En este estudio se utilizaron imágenes tipo Geo, que tienen el menor nivel de procesamiento, por lo que fue necesario aplicar corrección radiométrica (Saldaña, 2013) y luego, una corrección atmosférica (Domínguez *et al.*, 2018).

### Corrección radiométrica

Los píxeles de las imágenes se convirtieron mediante la Ecuación 1 (Kuester, 2017), a un mínimo de radiación espectral en la parte superior de la atmósfera, utilizando la información contenida en la metadata de cada imagen (Podger *et al.*, 2011).

$$L = \text{Ganancia} * ND * \left( \frac{\text{factor abscal}}{\text{ancho de banda efectivo}} \right) + \text{Pérdida} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde,

L : Es la radiancia espectral obtenida por el sensor ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ).

Ganancia : Es la ganancia de la calibración radiométrica ( $\text{mW}/\text{cm}^2/\mu\text{m}/\text{str}/\text{DN}$ ) de cada banda (Cuadro 3).

ND : O número digital, es el valor de píxel que se encuentra en las imágenes.

Factor abscal : Es un factor conversor de la radiancia relativa a absoluta específico para cada banda, sensor y año de adquisición de la imagen ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ).

Ancho de banda efectivo: Está asociado al Factor abscal. Es la amplitud de la radiación media de sus máximos rendimientos. Es un valor específico para cada banda y sensor ( $\mu\text{m}$ ).

Pérdida : Es la pérdida de la radiación radiométrica ( $\text{mW}/\text{cm}^2/\mu\text{m}/\text{str}$ ) de cada banda (Cuadro 3).

La ganancia y la pérdida de la calibración radiométrica son factores de ajuste dependientes de la banda de calibración radiométrica absoluta que se indican en el Cuadro 3 (Domínguez *et al.*, 2018; Kuester, 2017).

El valor correspondiente al factor abscal y el ancho de banda efectivo se obtiene de la metadata de cada imagen utilizada (Freemantle *et al.*, 2021).

**Cuadro 3.** Factores de ajuste de calibración imágenes GeoEye-1

Bandas	Ganancia	Pérdida
<b>Pancromática</b>	0.970	-1.926
<b>Azul</b>	1.063	-4.537
<b>Verde</b>	0.994	-4.175
<b>Rojo</b>	0.998	-3.754
<b>NIR</b>	0.994	-3.870

La radiancia del sensor se convirtió a reflectancia en el límite superior de la atmósfera, utilizando la ecuación 2 (Kuester, 2017; Randazzo *et al.*, 2020; Freemantle *et al.*, 2021):

$$\rho_{(TOA)} = \frac{L_{\lambda_{Pixel,Banda}} * d_{ES}^2 * \pi}{E_{sun\lambda} * \cos(\theta_s)} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde,

$\rho_{(TOA)}$  : Es la reflectancia en la parte superior de la atmósfera.

$L_{\lambda_{Pixel,Banda}}$  : Es la radiancia espectral obtenida al emplear la Ecuación 1 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ). Este valor se estima de manera independiente para cada banda y píxel.

$d_{ES}$  : Es la distancia entre la Tierra y el Sol en AU para la fecha de captación de las imágenes.

$E_{sun\lambda_{Banda}}$  : Es la irradiancia solar exoatmosférica promediada en banda a 1 AU ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ), usando la curva desarrollada por Thuillier *et al.*, 2003 (Cuadro 4). Este valor es entregado por el proveedor de las imágenes (Kuester, 2017; Freemantle *et al.*, 2021).

$\theta_s$  : Es el ángulo cenital solar, se calcula como la diferencia entre  $90^\circ$  (grados) y el ángulo proporcionado en la metadata de las imágenes, el cual varía dependiendo de la fecha en que fue capturada la imagen utilizada.

**Cuadro 4.** Irradiancia solar exoatmosférica según Kuester, 2017 para imágenes GeoEye-1

Bandas	$E_{sun\lambda_{Banda}}$
<b>Pancromática</b>	1610.73
<b>Azul</b>	1993.18
<b>Verde</b>	1828.83
<b>Rojo</b>	1491.49
<b>NIR</b>	1022.58

La reflectancia  $\rho_{(TOA)}$  obtenida tras la aplicación de la ecuación 2 se ve afectada por la composición atmosférica, y se ha observado que sólo menos del 1% de esta reflectancia contiene información sobre el agua (Wang, 2010).

### Corrección atmosférica

Se realizó una corrección atmosférica a través del análisis atmosférico rápido de línea de visión del hipercubo (FLAASH), herramienta integrada en el software ENVI (Randazzo *et*

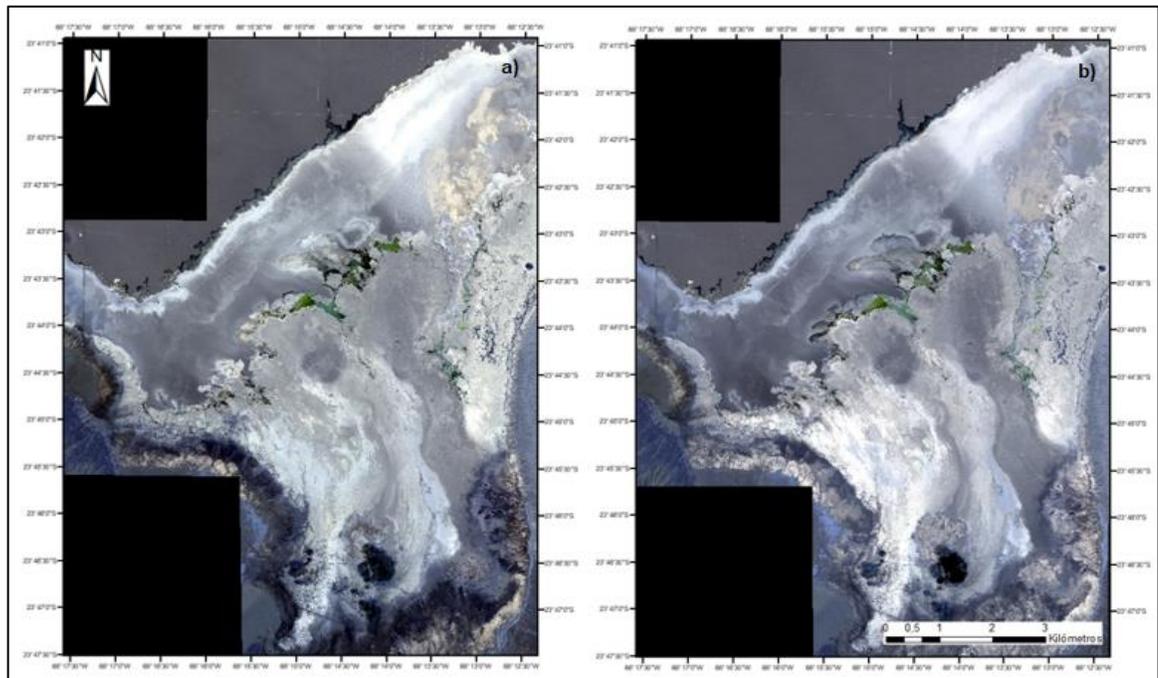
*al.*, 2020). FLAASH corrige las longitudes de onda desde las regiones del espectro visible hasta el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta, eliminando la absorción y la retrodispersión para obtener la reflectancia del agua (Eugenio *et al.*, 2017; Randazzo *et al.*, 2020).

Las características de relieve son propias de cada zona en estudio, y no fue necesario realizar una corrección topográfica de las imágenes, ya que las lagunas se encuentran insertas en el salar y no próximas al sector cordillerano (Ahumada, 2014).

#### b) Fotointerpretación

Se aplicó el método de fotointerpretación para identificar sistemas lacustres utilizando imágenes de GeoEye-1, ya que la resolución de estas imágenes es mayor a Landsat (Menéndez y Núñez, 2012). La validación de este procedimiento se realizó mediante inspección visual y se basa en que es una metodología de interpretación directa y no un proceso de inducción (MMA, 2012).

Se determinó la superficie (ha) del espejo de agua para el período húmedo (mayo, debido a disponibilidad de imagen) y seco (septiembre), mediante la utilización de 2 imágenes de alta resolución del satélite GeoEye-1 para el año 2017, y con sistema de referencia WGS84 (GeoEye, 2011; Saldaña, 2011). Estas imágenes tienen un costo de adquisición que varía entre \$17,50 y \$25,00 USD km<sup>2</sup> por lo que se trabajó con las imágenes disponibles. Las imágenes del satélite GeoEye-1, permitieron validar los resultados obtenidos mediante el uso de imágenes satelitales Landsat de menor resolución (Oyola, 2009; Rockwood Lithium, 2016; Aponte, 2018).



**Figura 3.** Imágenes de alta resolución GeoEye-1 Lagunas La Punta y La Brava: A) mayo 2017 y B) septiembre 2017.

Para determinar las áreas observadas de 2017, utilizando imágenes de alta resolución, se empleó el método de trazado de polígonos mediante fotointerpretación, considerando una capa vectorial de las lagunas La Punta y La Brava, obtenida desde la página de Infraestructura de Datos Geospaciales del Ministerio de Bienes Nacionales, con sistema de referencia WGS84 (Infraestructura de Datos Geospaciales, 2021). La capa vectorial se desplegó en el software ArcGIS para realizar el proceso de delimitación de los cuerpos lacustres, para la imagen del mes de mayo y la de septiembre de 2017 (Barrera, 2011; Rockwood Lithium, 2016; Albemarle, 2021), y se mantuvo la escala 1:100 en las imágenes.

Se calculó el área de las capas o polígonos (ha) y las áreas resultantes de este proceso fueron llamadas “áreas observadas” (Araya, 2021). El área cubierta por un píxel representa un promedio de lo que realmente hay en un lugar determinado, por lo que los límites trazados no necesariamente son los límites reales de las lagunas, pero al trabajar con imágenes de alta resolución, el resultado observado se asemeja a la superficie real (Barrera, 2011; Ministerio de Medio Ambiente, 2012).

### **Estimación del área del sistema lagunar La Punta y La Brava**

#### a) Obtención y corrección de imágenes satelitales

La serie Landsat cuenta con un nivel de detalle de 30 metros y con una resolución radiométrica de 8 bits para Landsat 4, 5 y 7 y de 12 bits para Landsat 8 (Picone, 2017). Las imágenes Landsat 5 Thematic Mapper (TM) consisten en 7 bandas espectrales con una

resolución espacial de 30 metros para las bandas 1 a 5 y 7 (espectro visible). Para el caso de la banda 6, la resolución es de 120 metros, pero se vuelve a muestrear a 30 metros/píxel. El tamaño aproximado de la escena es de 170 kilómetros de norte a sur por 183 kilómetros de este a oeste (Rey, 2020). El satélite Landsat 8 OLI adquiere datos en 11 bandas mediante dos sensores separados, el Operational Land Imager (OLI) y el Sensor Térmico Infrarrojo (TIRS). Las imágenes de Landsat OLI y TIRS constan de 9 bandas espectrales con una resolución de 30 metros para las bandas 1 a 7 y 9 (espectro visible). Para el caso de la banda 8 (pancromática) es de 15 metros (Berdugo y Reales, 2016). El tamaño aproximado de escena es de 170 kilómetros de norte a sur por 183 km de este a oeste (Picone, 2017).

Se utilizaron imágenes satelitales de las misiones Landsat 5 TM (Pardo-Pascual *et al.*, 2012), y Landsat 8 OLI (Ariza, 2013), debido a su buena resolución y libre acceso (Oyola, 2009). Se descartó el uso de imágenes Landsat 7 ETM+, ya que en el año 2002 el sensor presentó una falla en el sistema *Scan Line Corrector* (SLC), provocando un bandeo o efecto gaps en la imagen, lo que pudo alterar el análisis de resultados generados (González, 2018). La descarga de las imágenes satelitales se realizó desde la plataforma Earth Explorer (USGS, 2020), de *Landsat Collection 1 Level-2 (On-Demand)*. Las imágenes de esta colección se encuentran corregidas radiométrica y atmosféricamente (Chávez, 1996) y pertenecen al *path* 233, *row* 076, con tamaño de píxel de 30 metros y sistema de referencia WGS84 (USGS, 2020). En los cuadros 5 y 6, se detallan las características de los sensores Landsat TM y OLI.

Se descargaron dos imágenes satelitales por año, una correspondiente al período húmedo (marzo) y otra del período seco (septiembre), entre los años 1985 y 2019, y cuando esta condición no se cumplió, se descargaron imágenes de los meses más cercanos. Se utilizaron aquellas imágenes que presentaran menos del 10% de cobertura de nubes. El listado de imágenes descargadas para realizar este estudio se resume en el Apéndice 1.

Se estimó el área del sistema lagunar La Punta y La Brava, para el año 2017 considerando el período húmedo (mayo) y seco (septiembre), utilizando las imágenes Landsat 8 OLI y de alta resolución GeoEye-1.

Las imágenes Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI estaban corregidas previamente, tanto radiométrica como atmosféricamente (Espinosa *et al.*, 2011; Sarp y Ozcelik, 2017; Aponte, 2018; Soto *et al.*, 2019), y debido a las características de relieve propias de la zona en estudio, no fue necesario realizar una corrección topográfica, ya que las lagunas en estudio se encuentran insertas en el salar y no próximas al sector cordillerano (Ahumada, 2014). Se emplearon los datos que se encuentran en la “Metadata” de cada imagen y se utilizó el factor de conversión 0.0001, tanto para Landsat 5 TM como para Landsat 8 OLI, sugerido por la United States Geological Survey (2020) para emplear de manera correcta los datos de reflectancia de la superficie terrestre. Además, a través del uso del software ENVI, se acotó el área de interés solo al sector de las lagunas, ya que el tamaño de las imágenes es demasiado extenso (Castillo y Rodríguez, 2017). El número asignado a cada banda varía según si la imagen pertenece a Landsat 5 TM o Landsat 8 OLI. Los valores de las bandas utilizadas, según satélite, se detallan en el Cuadro 5.

**Cuadro 5.** Número de banda y longitud de onda en Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI

<b>Banda</b>	<b>Landsat 5 TM</b>		<b>Landsat 8 OLI</b>	
	N° Banda	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	N° Banda	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )
<b>Azul</b>	1	0.450 – 0.520	2	0.450 – 0.510
<b>Verde</b>	2	0.520 – 0.600	3	0.530 – 0.590
<b>Rojo</b>	3	0.630 – 0.690	4	0.640 – 0.690
<b>NIR</b>	4	0.760 – 0.900	5	0.850 – 0.880
<b>SWIR 1</b>	5	1.550 – 1.750	6	1.570 – 1.650
<b>SWIR 2</b>	7	2.080 – 2.350	7	2.110 – 2.290

b) Área estimada: Índices espectrales y clasificación no supervisada

Las imágenes satelitales (Landsat 8 OLI) seleccionadas correspondientes al 2017, se procesaron mediante el uso del software ENVI 5.3., aplicándose índices espectrales de agua. Los índices espectrales de agua son considerados como un método común de detección remota óptica utilizado para discriminar áreas acuáticas y no acuáticas (Karaman, 2021). Se aplicaron los índices: NDWI (McFeeters, 1996), MNDWI (Xu, 2006), SAVI (Huete, 1988), AWEI (Feyisa *et al.*, 2014) y Transformación Tasseled CAP Brightness (TCB; Kauth y Thomas, 1976; Sarp y Ozelik, 2017; Acharya *et al.*, 2018; Aponte, 2018; Aponte y Ospina, 2019; Insaurralde, 2019; Solovey, 2019; Ge *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020), y las ecuaciones se resumen en el Cuadro 6. Es importante mencionar que, el valor de L contenido en la ecuación del índice SAVI, en este estudio en particular, corresponde a 1, ya que el área donde se localiza el sistema lagunar La Punta y La Brava posee escasa vegetación (Huete, 1988, Soto *et al.*, 2019).

Cuadro 6. Índices espectrales considerados para la detección remota óptima de áreas acuáticas y no acuáticas

Índice	Ecuación	Referencia
<b>NDWI</b>	(1) $NDWI = \frac{(Verde - NIR)}{(Verde + NIR)}$	McFeeters (1996)
<b>MNDWI</b>	(2) $MNDWI_1 = \frac{(Verde - SWIR 1)}{(Verde + SWIR 1)}$	Xu (2006); Aponte (2018)
	(3) $MNDWI_2 = \frac{(Verde - SWIR 2)}{(Verde + SWIR 2)}$	
<b>SAVI</b>	(4) $SAVI = \frac{(NIR - Rojo)}{NIR + Rojo + L} * (1 + L)$	Huete (1988)
<b>AWEI</b>	(5) $AWEI_{sh} = Azul + 2.5 * Verde - 1.5 * (NIR + SWIR 1) - 0.25 * SWIR 2$	Feyisa <i>et al.</i> (2014); Mustafa <i>et al.</i> (2017)
	(6) $AWEI_{nsh} = 4 * (Verde - SWIR 1) - (0.25 * NIR + 2.75 * SWIR 1)$	
<b>Tasseled CAP Brightness</b>	(7) $TCB = (Azul * 0,3019) + (Verde * 0,2786) + (Rojo * 0,4733) + (NIR * 0,5599) + (SWIR 1 * 0,508) + (SWIR 2 * 0,1872)$	Crist <i>et al.</i> (1985); Baig <i>et al.</i> (2014)

Se diferenciaron las áreas inundadas de las no inundadas, mediante el uso de una máscara o binarización (Passucci *et al.*, 2017). El uso de este tipo de máscara implica ingresar, de manera manual, umbrales para separar las zonas que el índice considera “Agua” (áreas de color negro) de las zonas de “No agua” (áreas de color blanco; Passucci *et al.*, 2017). El umbral de separación utilizado para las imágenes obtenidas fue 0, considerado como umbral estándar de delimitación de cuerpos de agua (Zhai *et al.*, 2015; Sarp y Ozcelik, 2017; Acharya *et al.*, 2018; Aponte, 2018; Aponte y Ospina, 2019; Insaurralde, 2019; Solovey, 2019; Ge *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020). Este umbral fue empleado para todas las imágenes generadas tras la aplicación de los índices.

Se determinaron, mediante el uso de algoritmos automáticos, umbrales óptimos para cada índice espectral aplicado sobre las imágenes Landsat-8 OLI (Karaman, 2021). Estos umbrales óptimos se obtuvieron mediante el software ImageJ (Schindelin *et al.*, 2012), que permite el procesamiento de imágenes y es de libre acceso (Karaman, 2021). Se emplearon 16 algoritmos automáticos, contenidos en el software ImageJ, en la estimación de umbrales óptimos, los que se resumen en el Cuadro 7. La estimación de umbrales óptimos se realizó tanto para el período húmedo, como para el período seco correspondiente al año 2017. El software ImageJ, se utilizó para la distinción entre píxeles de agua y no agua (Sánchez-Sánchez *et al.*, 2019).

**Cuadro 7.** Algoritmos utilizados en el proceso de estimación de umbrales óptimos mediante ImageJ

Método	Referencia
<b>Fuzzy de Huang y Wang</b>	(Huang y Wang, 1995 en Karaman, 2021)
<b>Inter-Mode</b>	(Prewitt y Mendelsohn, 1966 en Karaman, 2021)
<b>Isodata</b>	(Ridler y Calvard, 1978 en Karaman, 2021)
<b>IJ_Isodata</b>	(Schindelin et al., 2012 en Karaman)
<b>Li y Tams</b>	(Li y Lee, 1993; Li y Tam, 1998; Sezgin y Sankur, 2004 en Karaman, 2021)
<b>Entropía máxima</b>	(Kapur <i>et al.</i> , 1985 en Karaman, 2021)
<b>Media</b>	(Glasbey, 1993 en Karaman, 2021)
<b>Mínimo Error</b>	(Kittler e Illingworth, 1986 en Karaman, 2021)
<b>Mínimo</b>	(Prewitt y Mendelsohn, 1966 en Karaman, 2021)
<b>Moment-Preserving</b>	(Tsai, 1985 en Karaman, 2021)
<b>Otsu</b>	(Otsu, 1979 en Karaman, 2021)
<b>Percentil</b>	(Doyle, 1962 en Karaman, 2021)
<b>Entropía de Renyi</b>	(Kapur <i>et al.</i> , 1985 en Karaman, 2021)
<b>Shanbhag's</b>	(Shanbhag, 1994 en Karaman, 2021)
<b>Triángulo</b>	(Zack <i>et al.</i> , 1977 en Karaman, 2021)
<b>Yen</b>	(Yen <i>et al.</i> , 1995 en Karaman, 2021)

Se aplicó una máscara o binarización, sobre todo el set de imágenes generadas, tras la aplicación de los índices espectrales, tal como se realizó al utilizar el umbral estándar. Se cuantificó la superficie que la máscara clasificó como “Agua” (Passucci *et al.*, 2017). Estas superficies fueron denominadas como “Áreas estimadas”, ya que se obtuvieron tras la aplicación de la técnica de índices espectrales (López *et al.*, 2001; Aponte, 2018; Aponte y Ospina, 2019; Barajas, 2020).

Se cuantificó el área de las lagunas mediante una clasificación no supervisada (Salamanca, 2018), mediante el uso del software ENVI 5.3 (Urquia, 2018). La clasificación no supervisada se realizó mediante el método “K-Means”, y consideró un total de 5 clases y 100 reiteraciones, donde la “Clase 1” fue considerada como “Agua”. La clasificación no supervisada, no requiere conocimiento previo del área de estudio (Oyola, 2009; Macedo-Cruz *et al.*, 2010).

### Variación espacio-temporal del sistema lagunar para el período 1985-2019

#### a) Selección del método

Se determinó el método (índice espectral o clasificación no supervisada) con mejor desempeño para establecer la detección remota óptica de áreas con agua y sin agua, mediante una comparación simple entre las “áreas observadas” y las “áreas estimadas” y se seleccionó la superficie más cercana (ha) y con valores absolutos, a lo obtenido en las “áreas observadas”, tanto para mayo como para septiembre del 2017, considerando éste como el

método más indicado para utilizar en el estudio, asumiendo que es el que mejor se adapta a las condiciones propias del área donde se encuentran insertas las lagunas La Punta y La Brava.

b) Construcción de la serie temporal

Se estimaron distintos umbrales óptimos para la serie Landsat 8 OLI y Landsat 5 TM, ya que presentan diferencias en radiometría y longitud de onda de banda, lo que a su vez genera problemas en el uso combinado de estos satélites para el análisis de series temporales (Zhu *et al.*, 2016).

Se construyó una serie temporal con el área estimada promedio con imágenes Landsat 5 TM, entre el año 1985 y el 2011, para marzo y septiembre, y se aplicó una máscara para separar los píxeles de agua y no agua mediante la binarización de imágenes. Se determinó el umbral de separación, con el software ImageJ, y se estimaron los umbrales óptimos. Las imágenes correspondientes a los años 1985, 1998 y 2011 se procesaron con el software ImageJ, de estas se obtuvo un valor promedio, que fue utilizado como umbral óptimo o valor de separación para definir “Agua” y “No Agua”. El valor de umbral óptimo se utilizó como valor de corte para todas las imágenes correspondientes a Landsat 5 TM. En la serie temporal también se incluyó el valor de las áreas estimadas con imágenes Landsat 8 OLI, entre el año 2012 y el 2019, para las épocas húmeda y seca. Es importante señalar que, para esta serie, el valor de corte empleado corresponde al mismo que se utilizó en las imágenes correspondientes al 2017, en el acápite “a) Selección del método” (Barrera, 2011; Rockwood Lithium, 2016; Sarp y Ozcelik, 2017; Comisión de Minería No Metálica; 2018; Albemarle, 2021).

c) Estimación de cambios de la superficie del sistema lagunar

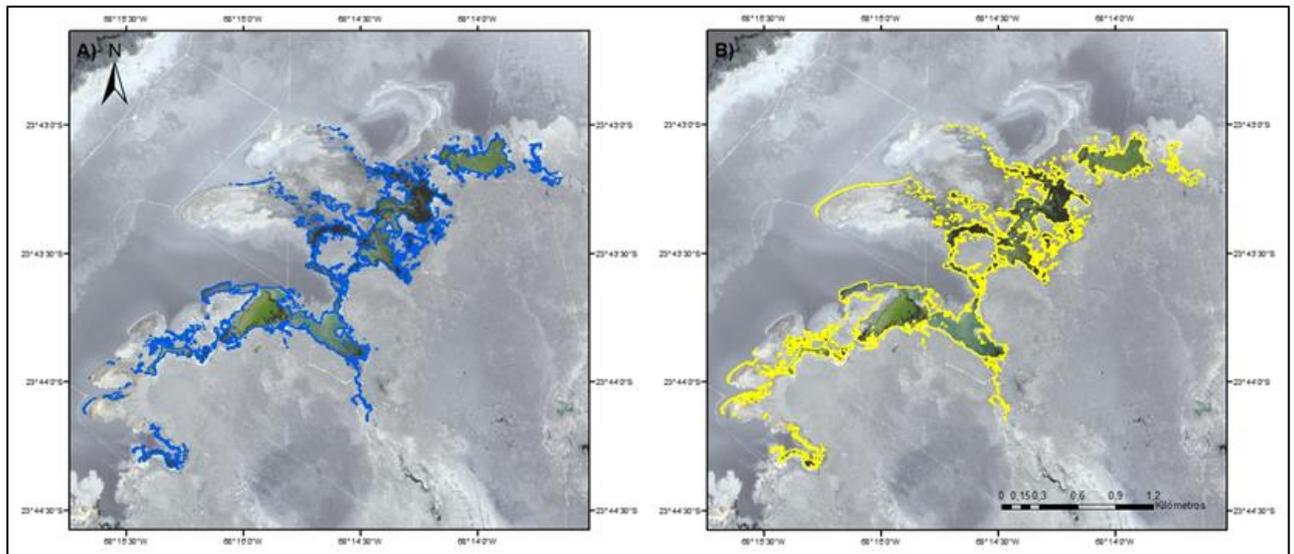
La variación de la superficie (ha) del sistema lagunar se estudió entre el año 1985 y 2019, se realizó un análisis comparativo cada 1, 5, 10 y 15 años, y se determinó la desviación simple para identificar los cambios en superficie (ha), entre los períodos descritos (Sarp y Ozcelik, 2017; Aponte, 2018; Aponte y Ospina, 2019).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Determinación de áreas observadas del sistema lagunar La Punta y La Brava

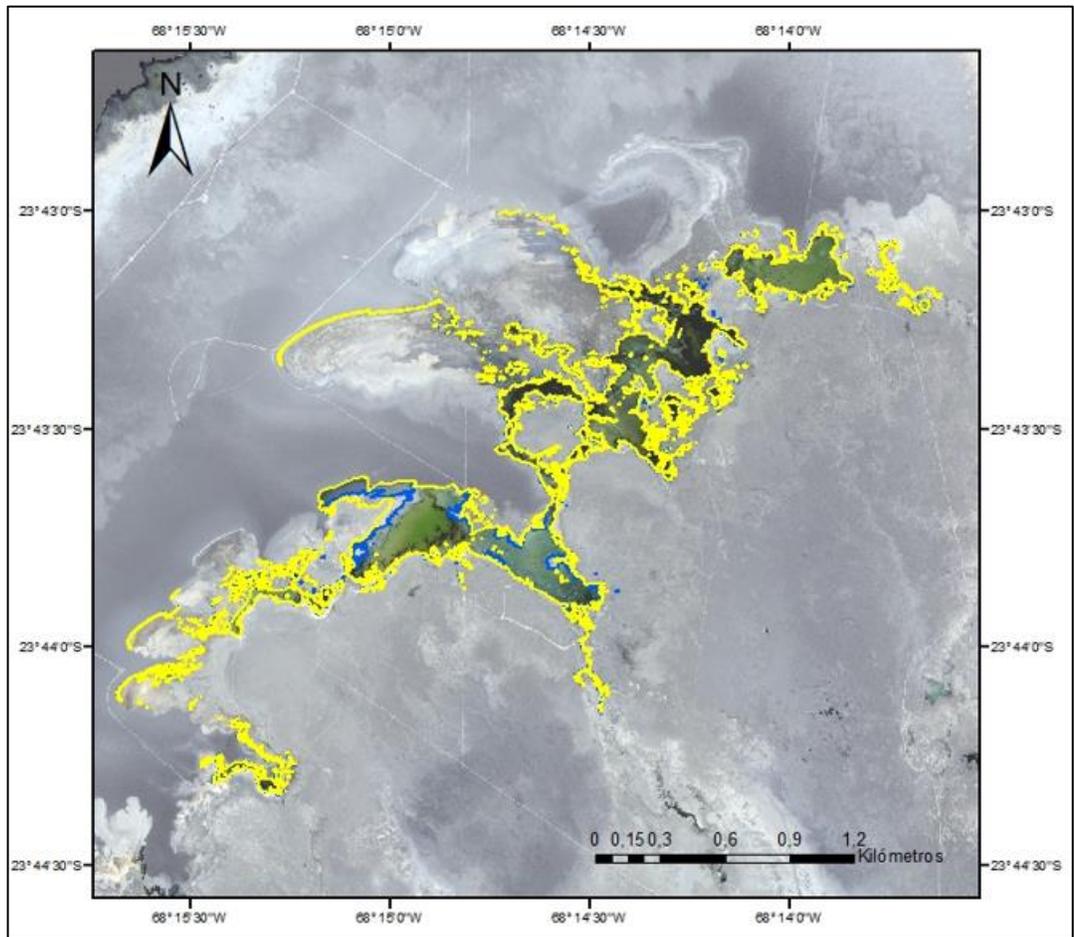
Este estudio utilizó el término “área observada” para referirse a la superficie lagunar obtenida luego de trazar polígonos sobre imágenes GeoEye-1, de alta resolución (píxel de 2 metros), mediante la técnica de fotointerpretación (Araya, 2021), correspondientes a mayo y septiembre de 2017. Esta técnica permite delimitar cuerpos de agua (Araya, 2021), y para ello requiere de una imagen de alta resolución, para obtener una calidad de resolución adecuada y visualizar correctamente el contorno de sistemas lacustres (Barrera, 2011; Ministerio de Medio Ambiente, 2012).

El trazado de polígonos mediante fotointerpretación sobre imágenes GeoEye-1, de alta resolución, permitió definir un área observada, de 66,10 ha para el período húmedo (Figura 4a), y 72,40 ha para período seco (Figura 4b), correspondientes a mayo y septiembre de 2017, respectivamente.



**Figura 4.** Delimitación de los cuerpos de agua del sistema laguna La Punta y La Brava, mediante fotointerpretación sobre imágenes GeoEye-1, para el año 2017. A) Período húmedo, en color azul (mayo) y B) Período seco, en color amarillo (septiembre).

En la Figura 5 se muestra mayor cantidad de superficie inundada en el periodo seco (septiembre), que en el periodo húmedo (mayo) del año 2017. La diferencia en las áreas observadas entre el periodo húmedo (mayo) y el periodo seco (septiembre), del año 2017 para el sistema lagunar La Punta y La Brava fue de 6,3 ha.



**Figura 5.** Áreas observadas en el periodo húmedo (mayo), en color azul, para el periodo seco (septiembre), en color amarillo, para el año 2017 en el sistema lagunar La Punta y La Brava.

**Estimación del área del sistema lagunar La Punta y La Brava, mediante aplicación de umbral estándar y umbrales óptimos. Determinación del método con mejor desempeño**

Se utilizó el umbral estándar (0) obtenido mediante revisión bibliográfica y umbrales óptimos (Cuadro 8) calculados a través del uso del software ImageJ para estimar las áreas consideradas como agua tanto para el período húmedo (marzo; Cuadro 9), como para el período seco (septiembre; Cuadro 11).

**Cuadro 8.** Umbrales óptimos obtenidos a través de la aplicación del software ImageJ para los distintos índices espectrales para el período húmedo (marzo) y seco (septiembre) del año 2017.

Índice Espectral	Período	Algoritmo	Umbral óptimo
<b>NDWI</b>	Húmedo	Entropía máxima	-0,07
	Seco		-0,05
<b>MNDWI_1</b>	Húmedo	Entropía máxima	0,42
	Seco		0,47
<b>MNDWI_2</b>	Húmedo	Entropía máxima	0,69
	Seco		0,70
<b>AWEIsh</b>	Húmedo	Entropía máxima	0,25
	Seco		0,34
<b>AWEInsh</b>	Húmedo	Entropía máxima	-0,05
	Seco		0,37
<b>TCB</b>	Húmedo	Entropía máxima	0,47
	Seco		0,44
<b>SAVI</b>	Húmedo	IJ_IsoData	0,00
	Seco		0,00

**Cuadro 9.** Áreas (ha) estimadas del espejo de agua mediante índices espectrales para el período húmedo (marzo) del año 2017, utilizando umbral estándar y umbrales óptimos.

ÍNDICE	NDWI	MNDWI_1	MNDWI_2	AWEIsh	AWEInsh	TCB	SAVI
<b>Umbral 0</b>	31,50	522,9	990,18	365,58	249,48	991,62	41,58
<b>Umbral óptimo</b>	39,51	50,85	67,41	42,93	269,54	48,06	41,58

En el Cuadro 9, se aprecia que el área estimada utilizando el umbral estándar con menor superficie, corresponde al índice NDWI con 31,50 ha y el área estimada con mayor superficie es TCB con 991,62 ha. Por otro lado, el área estimada con umbrales óptimos, con menor superficie, corresponde al índice NDWI con 39,51 ha, mientras que la mayor superficie estimada corresponde a la obtenida por el índice AWEInsh, con 269,54 ha.

Las áreas estimadas por aplicación de los índices espectrales se compararon con las áreas observadas a través de fotointerpretación para el período húmedo, y se observan diferencias que se resumen en el Cuadro 10.

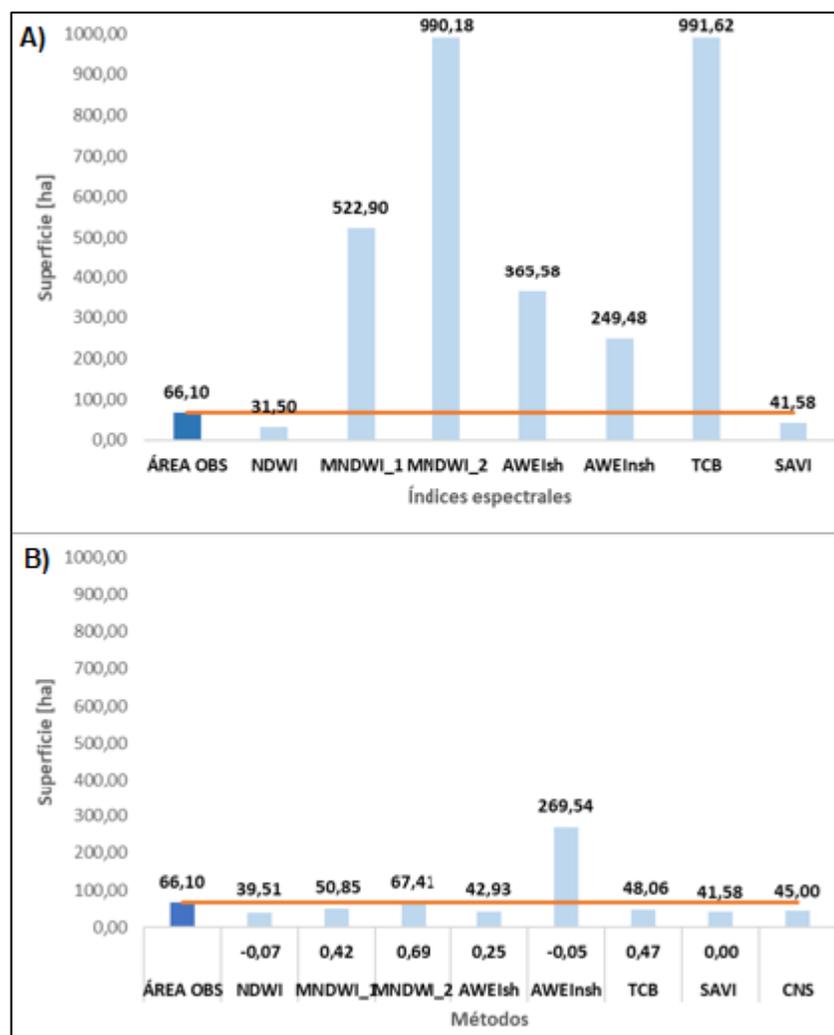
**Cuadro 10.** Diferencia entre áreas observadas y áreas estimadas (ha) del espejo de agua, mediante índices espectrales, para el período húmedo, 2017, utilizando umbral estándar y umbrales óptimos.

ÍNDICE	NDWI	MNDW I_1	MNDW I_2	AWEI sh	AWEI nsh	TCB	SAVI	CNS
<b>Área estimada con umbral estándar (ha)</b>	31,50	522,90	990,18	365,58	249,48	991,62	41,58	-
<b>Diferencia con área observada (ha)</b>	-34,60	456,80	924,08	299,48	183,38	925,52	-24,52	-
<b>Área estimada con umbrales óptimos (ha)</b>	39,51	50,85	67,41	42,93	269,54	48,06	41,58	45,00
<b>Diferencia con área observada (ha)</b>	-26,59	-15,25	1,31	-23,17	203,44	-18,04	-24,52	-21,10

En el Cuadro 10 se muestran las áreas estimadas mediante la aplicación de índices espectrales, tanto para umbral estándar (0) como para umbrales óptimos, las cuales varían dependiendo del indicador utilizado. Considerando que el área calculada por fotointerpretación para el período húmedo fue de 66,10 ha, el índice espectral que tuvo mejor rendimiento, utilizando como punto de corte el umbral estándar (0), fue el SAVI con 41,58 ha, con una diferencia de -24,52 ha de superficie con respecto al área observada, subestimando la superficie lagunar en un 52,3% (Figura 6A). En cambio, el índice espectral con peor desempeño fue TBC, con una estimación de 991,62 ha, y una diferencia de 925,52 ha. El índice TCB sobreestimó la superficie de las lagunas en un 1400,2% (Figura 6A).

En cuanto a las áreas estimadas utilizando como punto de corte los umbrales óptimos, el índice espectral MNDWI\_2, fue el que mostró menor diferencia entre lo observado y lo estimado, con una diferencia de 1,31 ha, sobreestimando en un 1,98% la superficie lagunar (Cuadro 12). Por el contrario, el índice espectral AWEInsh fue el que mostró mayor diferencia entre lo estimado y lo observado, con una sobreestimación del 307,78% (Cuadro 10 y Figura 6B).

Además de los índices espectrales, se determinó la superficie del sistema lagunar La Punta - La Brava, mediante el método de clasificación no supervisada. Se estimó la superficie de manera automática utilizando umbrales de corte preestablecidos en el software, y creando, de manera manual, distintas clases dentro de la imagen de salida, siendo una de dichas clases correspondiente a lo que el algoritmo clasifica como píxeles de agua. El método de clasificación no supervisada subestimó en un 31,92%, arrojando como resultado un área estimada de 45,00 ha, por lo que este método arrojó resultados menos precisos que lo obtenido a través del MNDWI\_2 (Cuadro 10 y Figura 6B).



**Figura 6.** Área estimada del sistema lagunar La Punta - La Brava. A) utilizando índices espectrales y umbral estándar (0) para el período húmedo, en el año 2017. B) utilizando índices espectrales y umbrales óptimos, y el método de clasificación no supervisada, para el período húmedo, en el año 2017. La línea roja indica el área observada (66,10 ha).

Por otra parte, para el período seco, se obtuvo las siguientes áreas estimadas para las lagunas La Punta y La Brava para el 2017, utilizando como punto de corte, el umbral estándar y los umbrales óptimos para cada índice espectral utilizado en este estudio (Cuadro 11).

**Cuadro 11.** Áreas (ha) estimadas del espejo de agua mediante índices espectrales para el período seco (septiembre) del año 2017, utilizando umbral estándar y umbrales óptimos.

ÍNDICE	NDWI	MNDWI_1	MNDWI_2	AWEIsh	AWEInsh	TCB	SAVI
<b>Umbral 0</b>	38,70	563,31	988,74	437,31	321,03	991,62	47,07
<b>Umbral óptimo</b>	44,28	55,98	66,42	48,96	125,01	53,55	47,07

En el Cuadro 11, se observa que, al emplear el umbral 0 como valor de corte para diferenciar zonas de agua como de no agua, el área estimada con menor superficie corresponde a la obtenida tras la aplicación del índice espectral NDWI con 38,70 ha y, el área estimada con mayor superficie, es aquella obtenida luego de aplicar el índice TCB con 991,62 ha.

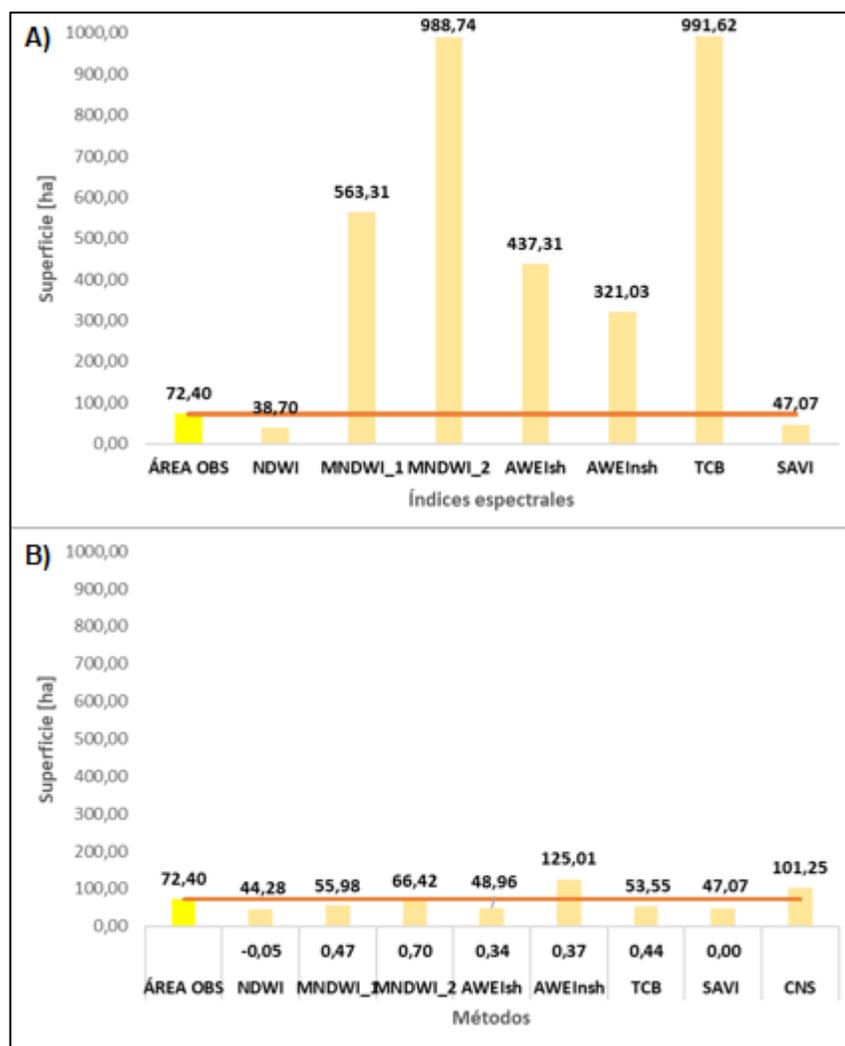
Las áreas estimadas tras la aplicación de índices espectrales se compararon con el área observada por fotointerpretación para el período seco. Estas diferencias se presentan en el Cuadro 12.

**Cuadro 12.** Áreas estimadas del espejo de agua mediante índices espectrales para el período seco (septiembre) del año 2017, utilizando umbral estándar y umbrales óptimos

ÍNDICE	NDWI	MNDW I_1	MNDW I_2	AWEI sh	AWEI nsh	TCB	SAVI	CNS
<b>Área estimada con umbral estándar (0)</b>	38,70	563,31	988,74	437,31	321,03	991,62	47,07	-
<b>Diferencia con área observada (ha)</b>	-33,70	490,91	916,34	364,91	248,63	919,22	-25,33	-
<b>Área estimada con umbrales óptimos</b>	44,28	55,98	66,42	48,96	125,01	53,55	47,07	101,25
<b>Diferencia con área observada (ha)</b>	-28,12	-16,42	-5,98	-23,44	52,61	-18,85	-25,33	28,85

En el Cuadro 12, se indican las áreas estimadas a través de índices espectrales utilizando tanto el umbral estándar como los umbrales óptimos para diferenciar los píxeles de agua y no agua. Las superficies obtenidas difieren entre sí, dependiendo del método utilizado. Tomando en cuenta que el área observada por fotointerpretación para el período seco fue de 72,40 ha, el índice espectral que tuvo mejor rendimiento fue el SAVI con 47,07 ha, con una diferencia de -25,33 ha de superficie con respecto al área observada, subestimando el área de las lagunas en un 46,5% (Figura 7A). Por otro lado, el índice espectral con peor desempeño fue TBC, con una estimación de 991,62 ha, y una diferencia de 919,22 ha, sobreestimando la superficie lagunar en un 1269,62% (Figura 7A).

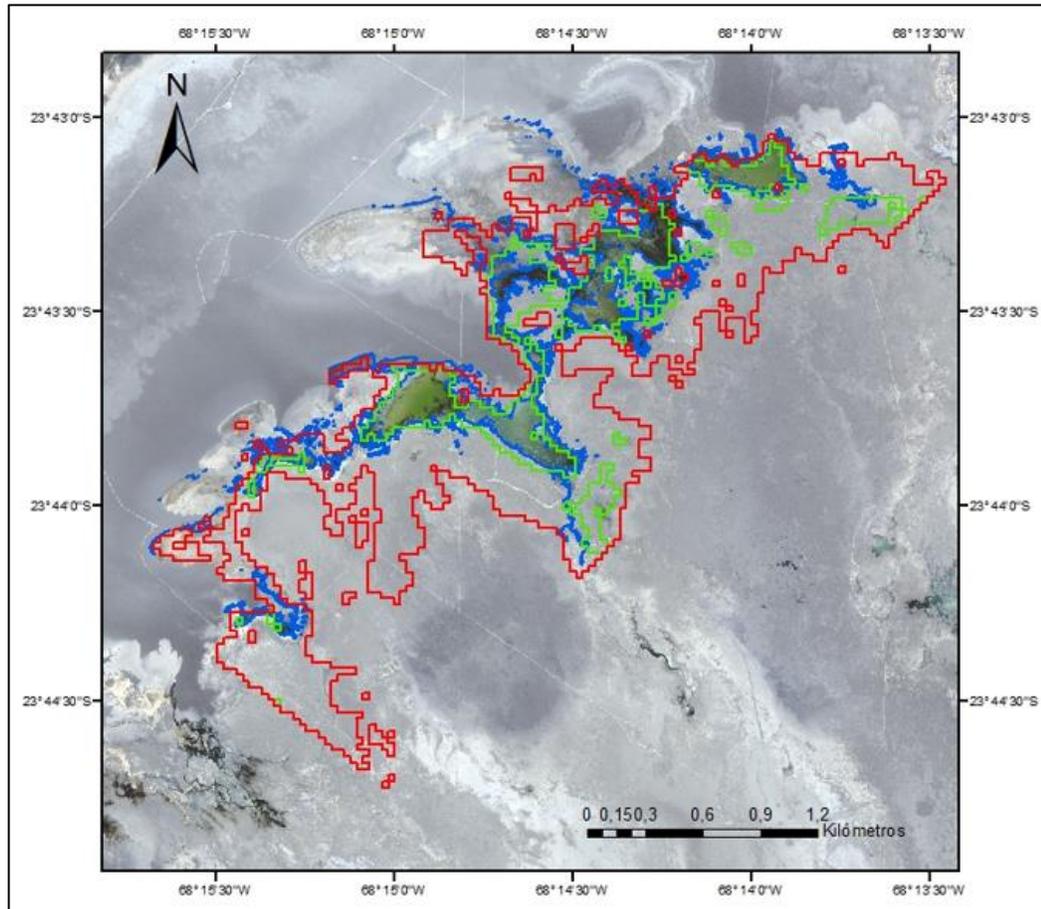
En cuanto a las áreas estimadas utilizando como punto de corte los umbrales óptimos, el índice espectral MNDWI\_2 fue el que mostró mejor rendimiento, ya que la diferencia entre lo observado y lo estimado fue menor, con -5,98 ha, subestimando la superficie lagunar en un 8,26% (Cuadro 12). Por el contrario, el índice espectral AWEInsh fue el que mostró mayor diferencia entre lo estimado y lo observado, con una sobreestimación del 307,78% (Cuadro 12). Para el caso de la época seca, y al igual que en la época húmeda, se aplicó una clasificación no supervisada, para comparar este método con el de índices espectrales. El método de clasificación no supervisada subestimó en un 39,85% la superficie de las lagunas, arrojando resultados menos precisos que lo obtenido a través del MNDWI\_2 (Cuadro 12 y Figura 7B).



**Figura 7.** Áreas estimadas del sistema lagunar La Punta - La Brava. A) utilizando índices espectrales y umbral estándar (0) para el período seco, en el año 2017. B) utilizando índices espectrales y umbrales óptimos, y el método de clasificación no supervisada, para el período seco, en el año 2017. La línea roja indica el área observada (72,40 ha).

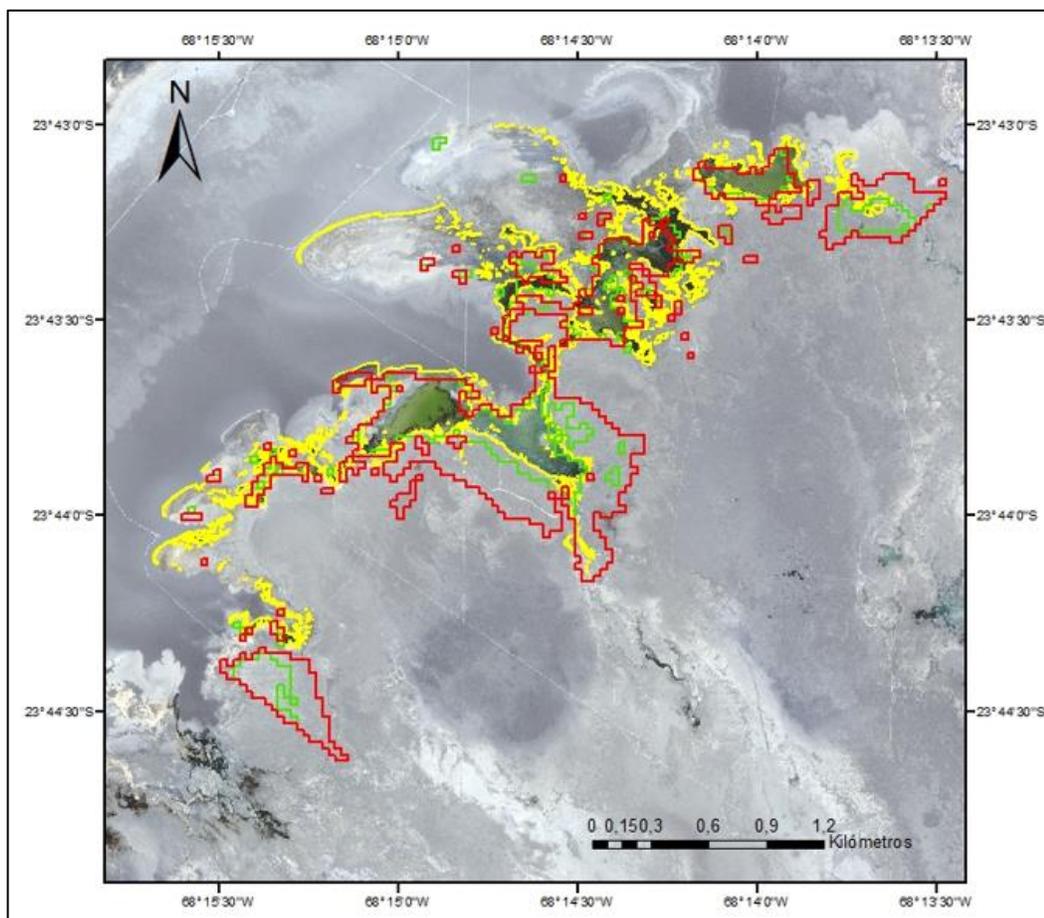
El rendimiento de los diferentes índices espectrales utilizados para la estimación de la superficie lagunar, mejoró cuando se utilizó, como punto de corte, los umbrales óptimos (Cuadro 10 y 12). Específicamente, el umbral óptimo estimado, para el caso del índice MNDWI\_2, corresponde a 0,6895 para la época húmeda y 0,6969 para la época seca, considerando imágenes de la colección Landsat 8 OLI, del 2017. La obtención de estos valores de umbral permitió disminuir las diferencias entre lo estimado y lo observado (Cuadros 10 y 12), disminución que fue considerada como factor relevante en la selección del método con mejor desempeño, entre índices espectrales y clasificación no supervisada. Finalmente, se obtuvo que el índice MNDWI\_2 fue el de mejor rendimiento y el más adecuado para la estimar el área del sistema lagunar La Punta - La Brava, tanto para el período húmedo, como para el período seco del año 2017.

En la Figura 8 se presenta el área estimada del sistema lagunar La Punta - La Brava, mediante el índice espectral MNDWI\_2 con el mejor desempeño (Figura 8, color verde) y con el índice espectral AWEInsh con el peor desempeño (Figura 8, color rojo), debido a la sobreestimación de la columna de agua, en comparación al área observada (color azul) a través de fotointerpretación para el período húmedo en el año 2017.



**Figura 8.** Sistema lagunar La Punta - La Brava, período húmedo, año 2017. Área observada, en color azul. Área estimada con el índice espectral MNDWI\_2, en color verde. Área estimada con el índice espectral AWEInsh, en color rojo.

En la Figura 9, se presentan las áreas estimadas del sistema lagunar La Punta - La Brava, mediante el índice espectral MNDWI\_2 con el mejor desempeño (Figura 9, color verde) y con el índice espectral AWEInsh con el peor desempeño (Figura 9, color rojo), debido a la sobreestimación de la superficie con presencia de agua, en comparación al área observada (color amarillo) a través de fotointerpretación, para el período seco en el año 2017.



**Figura 9.** Sistema lagunar La Punta - La Brava, periodo seco, año 2017. Área observada, en color amarillo. Área estimada con el índice espectral MNDWI\_2, en color verde. Área estimada con el índice espectral AWEInsh 2, en color rojo.

La variabilidad observada entre los diferentes índices y puntos de corte, se pudo deber a factores que reducen la precisión de los sensores remotos, tales como: la presencia de sombras, la existencia de lagunas someras, fondos complejos (coloraciones y formas), variaciones abruptas de las columnas de agua (Li *et al.*, 2021). También producto de la presencia de lava negra o sales, ya sea en el fondo de las lagunas o en sus contornos (Ji y Gong, 2018); o bien por las características físicas y químicas del agua (turbidez, presencia de elementos reflectantes), presencia de contaminación de aguas, así como las condiciones atmosféricas al momento de la medición (Karaman, 2021).

En el caso del sistema lagunar La Punta - La Brava, la variación se pudo deber a las condiciones someras de la laguna, la variabilidad de formas y colores del fondo de las mismas; así como la presencia de formaciones negras y grandes acumulaciones de sal (Ji y Gong, 2018; Li *et al.*, 2021). Estas condiciones generan variaciones en la reflectancia del agua, puesto que esta es proporcional a la calidad de la misma, pero tiene una relación inversa con su profundidad. Esto podría llevar a los índices a generar errores de asignación en los

píxeles (Ji y Gong, 2018), en particular en aquellos en zonas de borde o transición que comparten un alto contenido de agua, pero no se encuentran sumergidos, y píxeles ubicados en áreas muy poco profundas, estando en ambos casos limitados al sustrato sedimental (Casal, 2022). En el caso de las lagunas insertas en sistemas de Salar, además, algunos píxeles podrían presentar problemas de clasificación debido a la existencia de delgadas películas de agua producto del ascenso capilar, por las dinámicas ecológicas propias del Salar (Ruch *et al.*, 2012; Ji y Gong, 2018).

Ante ello, la selección de un umbral de corte a partir de la comparación entre superficies observadas (fotointerpretación) y áreas estimadas, permite mejorar el rendimiento del índice; puesto que mejora la precisión al clasificar diferentes tipos de fondo y condiciones ecológicas (Ji y Gong, 2018; Li *et al.*, 2021).

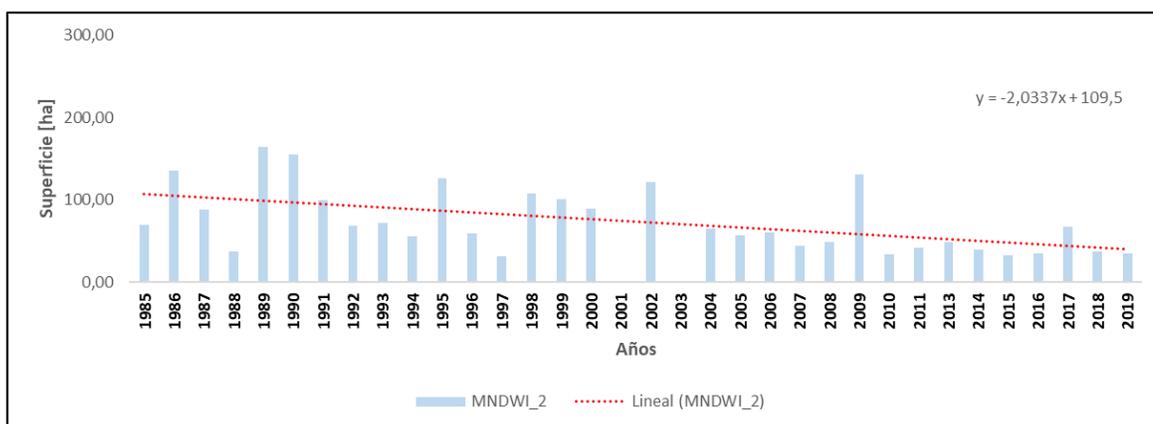
### **Serie temporal 1985-2019: Superficies sistema lagunar La Punta y La Brava**

A partir de los resultados obtenidos, se construyó una serie temporal entre los años 1985-2019. El método espectral MNDWI\_2, de mejor desempeño, se utilizó para estimar las áreas del sistema lagunar La Punta - La Brava (Cuadros 9 y 11). Las imágenes de la serie Landsat 5 TM utilizadas en este estudio fueron procesadas de manera diferente a las imágenes de la serie Landsat 8 OLI, ya que el umbral de corte utilizado entre ambas series de imágenes fue distinto. Para las imágenes de la serie Landsat 5 TM, para el periodo 1985 - 2011, se utilizó un umbral óptimo promedio estimado de 0,6889 para el período húmedo y 0,6926 para el período seco (Cuadro 13). Es importante mencionar que la estimación de los promedios antes señalados (época húmeda y época seca), se utilizaron los umbrales óptimos obtenidos tras el ajuste realizado con el software ImageJ, considerando los años 1985, 1998 y 2011. Para las imágenes de la serie Landsat 8 OLI del periodo 2013 - 2019, se utilizó un umbral óptimo promedio estimado de 0,6895 para el período húmedo y 0,6969 para el período seco (Cuadro 13), que fueron los umbrales obtenidos para el año 2017 en la determinación del método con mejor desempeño.

**Cuadro 13.** Umbral óptimo promedio estimado para Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI

Serie	Época húmeda	Época seca
<b>Landsat 5 TM</b>	0,6889	0,6926
<b>Landsat 8 OLI</b>	0,6895	0,6969

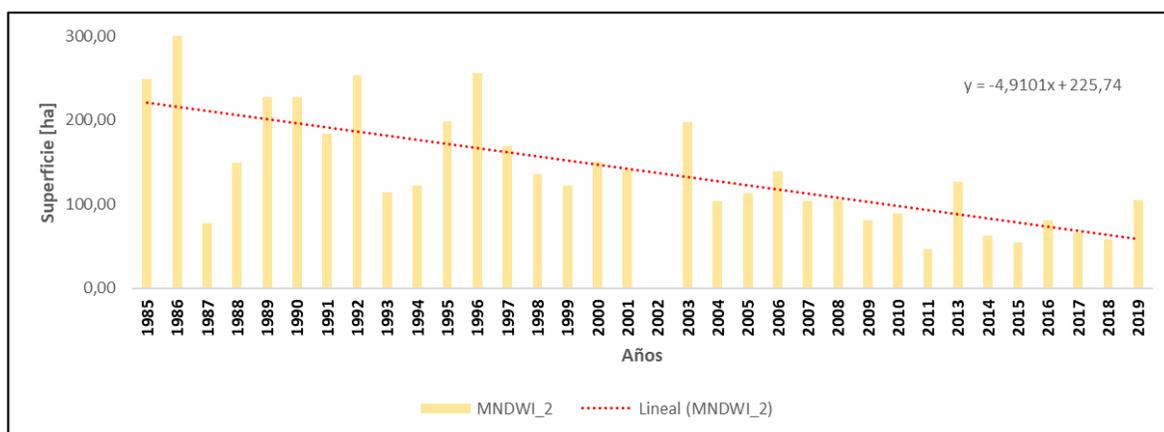
En la Figura 10 se muestra la serie temporal 1985-2019 de áreas estimadas del espejo de agua, con el método espectral MNDWI\_2, para el período húmedo (marzo).



**Figura 10.** Serie temporal 1985 – 2019 del área estimada de la superficie cubierta con agua del sistema lagunar La Punta - La Brava, para el período húmedo, con índice espectral MNDWI\_2. La línea roja de punto discontinuo muestra la tendencia lineal del comportamiento de la superficie inundada.

Las variaciones de la extensión del espejo de agua (ha) del sistema lagunar La Punta y La Brava (Figura 10), se muestra en la serie de tiempo 1985-2019, para el período húmedo (marzo). La superficie (ha) medida entre 1985 - 2002, muestra la mayor extensión de superficie promedio cubierta con un promedio de 93,23 ha aproximadamente, y entre el año 2004-2019 se observa una disminución de las áreas estimadas, a excepción del 2009 (Figura 10). Se utilizó una línea de tendencia lineal, la cual presenta una pendiente negativa, con una velocidad de pérdida de la extensión del espejo de agua de 2,03 ha año (Cuadro 13). La serie de datos, muestra la ocurrencia de máximos de superficie cubierta con agua en los años 1989, 1990, 1995, 2002 y 2009. Al aplicar el índice espectral MNDWI\_2 en la imagen correspondiente a la época húmeda del 2001, los valores obtenidos fueron mayores al umbral empleado para separar píxeles de agua y no agua, por lo que no fue posible obtener un área estimada. Para el caso de 2003, no había imagen Landsat disponible para la época en estudio, por lo que no se realizó estimación de superficie lagunar para ese año en particular.

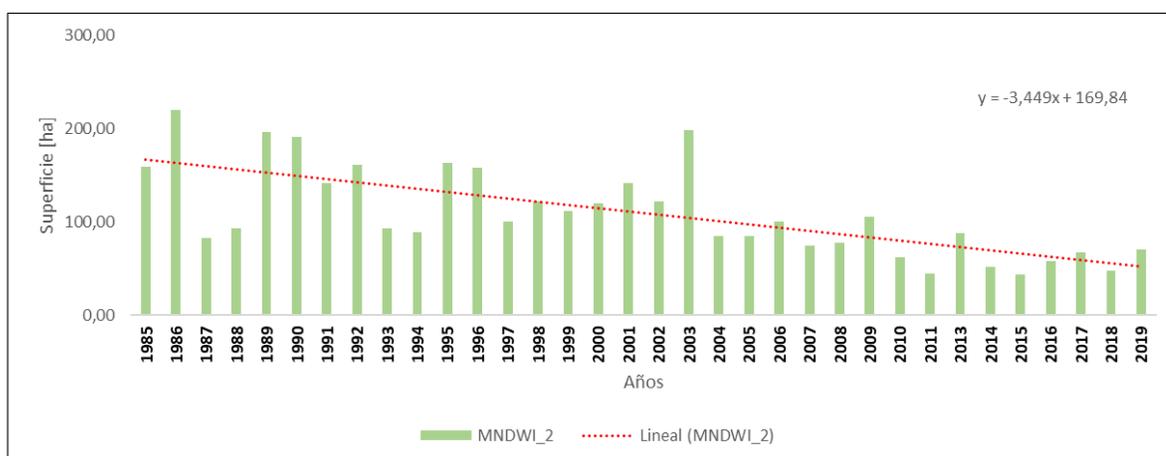
En la Figura 11 se muestra la serie temporal 1985-2019, de áreas estimadas del espejo de agua, con el método espectral MNDWI\_2, para el período seco (septiembre).



**Figura 11.** Serie temporal 1985 – 2019 del área estimada de la superficie cubierta con agua del sistema lagunar La Punta y La Brava, para el período seco, con índice espectral MNDWI\_2. La línea roja de punto discontinuo muestra la tendencia lineal del comportamiento de la superficie inundada.

Las variaciones de la extensión del espejo de agua (ha) del sistema lagunar La Punta y La Brava (Figura 11), se muestra en la serie de tiempo medida entre los años 1985-2019, para el período seco (septiembre). La superficie (ha) medida entre 1985 - 2002, oscila entre 100 y 300 ha, y con una disminución sostenida entre 2003 y 2019 (Figura 11). Se utilizó una línea de tendencia lineal, la cual presenta una pendiente negativa, con una velocidad de pérdida de la extensión del espejo de agua de 4,91 ha año (Cuadro 13). Es importante mencionar que, para el año 2002, no se contó con imagen Landsat disponible para la época en estudio, por lo que no fue posible realizar la estimación de la superficie lagunar para ese año en particular.

En la Figura 12 se muestra la serie temporal 1985-2019, con el promedio anual de áreas estimadas del espejo de agua, con el método espectral MNDWI\_2, para el sistema lagunar La Punta - La Brava. El promedio anual corresponde al promedio de los valores de áreas estimadas del espejo de agua para el período húmedo y para el período seco de cada año, entre 1985 y 2019.



**Figura 12.** Serie temporal 1985 – 2019 del área estimada promedio anual de la superficie cubierta con agua del sistema lagunar La Punta y La Brava, con índice espectral MNDWI\_2. La línea roja de punto discontinuo muestra la tendencia lineal del comportamiento de la superficie inundada.

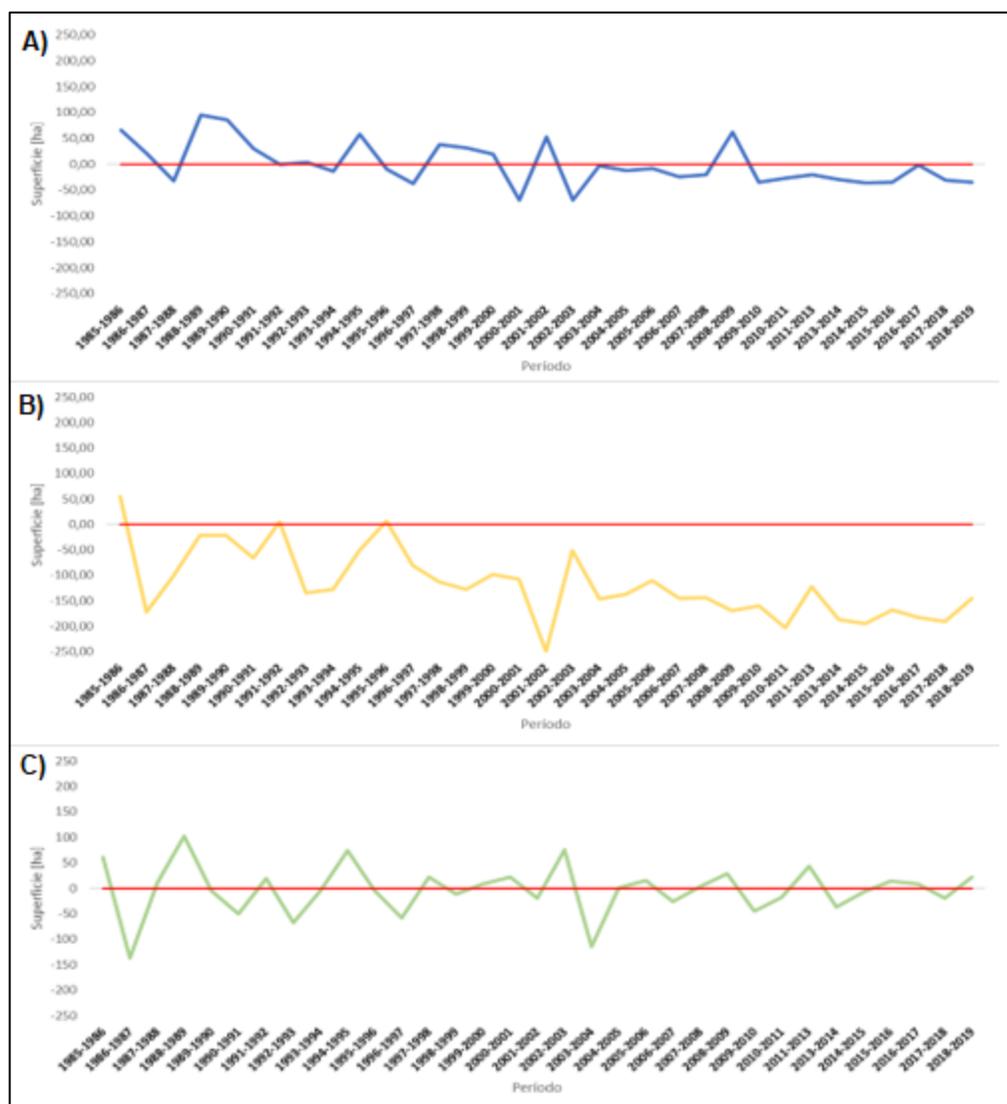
Las variaciones de la extensión del espejo de agua (ha) del sistema lagunar La Punta - La Brava (Figura 12), se muestra en la serie de tiempo medida entre los años 1985-2019, para el promedio anual. La superficie (ha) medida entre 1985 – 2002, tiene una marcada tendencia a la disminución del espejo de agua, y con una disminución sostenida entre 1985 y 2019 (Figura 12). Se utilizó una línea de tendencia lineal, la cual presenta una pendiente negativa, con una velocidad de pérdida de la extensión del espejo de agua de 3,45 ha año (ver Cuadro 14). La serie de datos, muestra la ocurrencia de máximos de superficie cubierta con agua en los años 1986, 1989, 1990, y 2003, mínimos en los años 1987, 2004, 2011 y 2015.

**Cuadro 14.** Ecuación de la recta correspondiente a las líneas de tendencia de las series de tiempo para el período húmedo, período seco y promedio anual

Serie de tiempo 1985 – 2019	Ecuación de la recta
<b>Época húmeda</b>	$y = -2,0337x + 109,5$
<b>Época seca</b>	$y = -4,9101x + 225,74$
<b>Promedio anual</b>	$y = -3,449 + 169,84$

### Estimación de cambios de la superficie del sistema lagunar La Punta y La Brava

El estudio de los cambios en la superficie del espejo de agua con el índice espectral MNDWI\_2, de la serie de tiempo 1985 - 2019 para el sistema lagunar La Punta y La Brava, fue realizado considerando secuencias de 1, 5, 10 y 15 años, para los periodos húmedo (marzo), seco (septiembre) y anual (promedio). En la Figura 13 se resumen los cambios interanuales de la superficie del espejo de agua entre 1985-2019.



**Figura 13.** Cambios interanuales en la superficie del espejo de agua (ha), estimados con el índice MNDWI\_2, entre los años 1985 y 2019. A) Período húmedo (mayo) B) Período seco (septiembre) y C) Período anual (promedio).

Los cambios interanuales de la superficie del sistema lagunar La Punta y La Brava, se producen principalmente en el período seco (septiembre) y consistentemente desde 1995-1996, que mantiene una disminución del espejo de agua hasta el 2018-2019 (Figura 13). La estimación porcentual de los cambios interanuales se resume en el Apéndice 2.

Los cambios de la superficie del sistema lagunar La Punta y La Brava, para ciclos de 5, 10 y 15 años, y período húmedo (marzo) y seco (septiembre) se resumen en los Cuadros 15, 16 y 17, respectivamente.

**Cuadro 15.** Cambio en superficie del espejo de agua del sistema lagunar La Punta y La Brava para un ciclo de 5 años entre 1985-2019, periodo húmedo y seco.

MNDWI_2	Periodo húmedo		Periodo seco	
Ciclo	Diferencia (ha)	Diferencia (%)	Diferencia (ha)	Diferencia (%)
<b>1985-1990</b>	88,92	81,90	-13,14	-4,70
<b>1990-1995</b>	-28,98	-14,70	-32,40	-12,20
<b>1995-2000</b>	-42,93	-25,50	-45,72	-19,60
<b>2005-2005</b>	-37,26	-29,70	-27,81	-14,80
<b>2005-2010</b>	-43,38	-49,10	-36,18	-22,60
<b>2010-2015</b>	-12,69	-28,20	-66,42	-53,70
<b>2015-2019</b>	4,59	14,20	52,74	92,00

**Cuadro 16.** Cambio en superficie del espejo de agua del sistema lagunar La Punta y La Brava para un ciclo de 10 años entre 1985-2019, periodo húmedo y seco.

MNDWI_2	Periodo húmedo		Periodo seco	
Ciclo	Diferencia (ha)	Diferencia (%)	Diferencia (ha)	Diferencia (%)
<b>1985-1995</b>	59,94	55,20	-45,54	-16,30
<b>1995-2005</b>	-80,19	-47,60	-73,53	-31,50
<b>2005-2015</b>	-56,07	-63,40	-102,6	-64,20
<b>2015-2019</b>	52,47	14,20	52,74	92,00

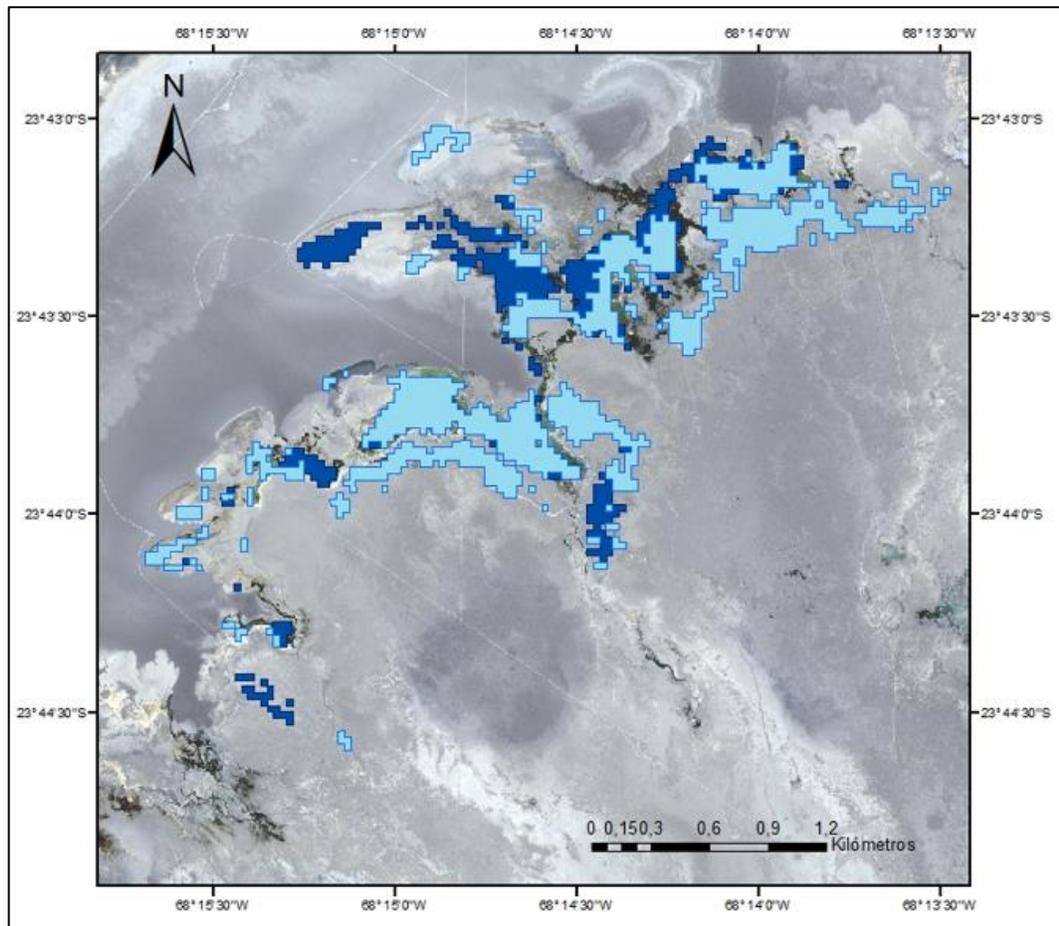
**Cuadro 17.** Cambio en superficie del espejo de agua del sistema lagunar La Punta y La Brava para un ciclo de 15 años entre 1985-2019, periodo húmedo y seco.

MNDWI_2	Periodo húmedo		Periodo seco	
Ciclo	Diferencia (ha)	Diferencia (%)	Diferencia (ha)	Diferencia (%)
<b>1985-2000</b>	17,01	15,70	-91,26	-32,70
<b>2000-2015</b>	-93,33	-74,30	-130,41	-69,50
<b>2015-2019</b>	52,47	14,20	52,74	92,00

Los cambios en el espejo de agua del sistema lagunar La Punta y La Brava, para ciclos de 5, 10 y 15 años, entre 1985-2019, muestran una disminución consistente en la superficie cubierta con agua, la cual es más profunda en el periodo seco (septiembre), que en el período húmedo (Cuadros 15, 16 y 17). Sin embargo, al comparar las áreas estimadas entre 2015 y 2019, en este último año existe un ascenso en el valor de superficie de las lagunas, marcando una diferencia del 14,2% para el período húmedo y del 92,00% para la época seca. Este resultado se considera un punto de quiebre en la tendencia a la baja que se observa en el resto de los ciclos estudiados.

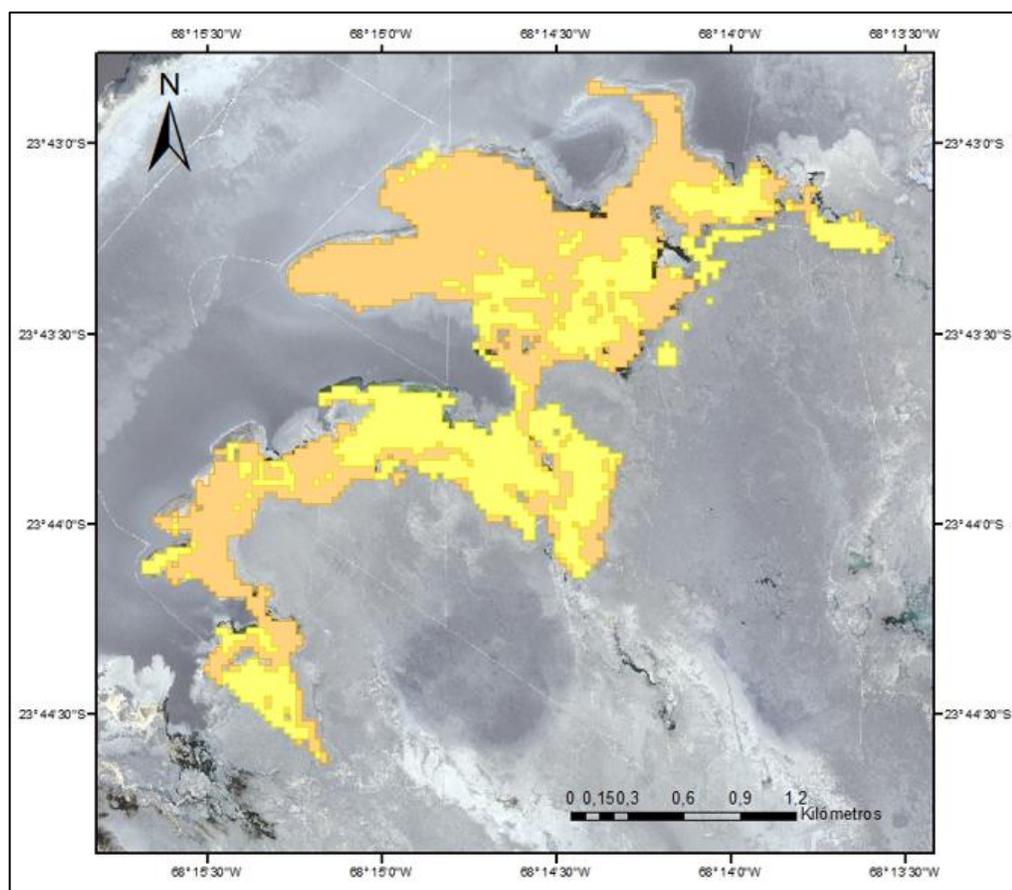
En la Figura 14, se muestra la diferencia entre el área estimada del sistema lagunar La Punta - La Brava, mediante el índice espectral MNDWI\_2, para el año 1985 y el año 2019, para el período húmedo. El área estimada para el año 2019 tiene una diferencia de -34,29 ha, con el

área estimada para el mismo período en el año 1985, lo que representa una disminución del -49,48%.



**Figura 14.** Área estimada del sistema lagunar La Punta -La Brava, mediante el índice espectral MNDWI\_2, para el año 1985 (azul claro) y el año 2019 (azul fuerte), para el período húmedo.

En la Figura 15, se muestra la diferencia entre el área estimada del sistema lagunar La Punta - La Brava, mediante el índice espectral MNDWI\_2, para el año 1985 y el año 2019, para el período seco. El área estimada para el año 2019 tiene una diferencia de -144,54 ha, con el área estimada para el mismo período en el año 1985, lo que representa una disminución del -57,96%.



**Figura 15.** Área estimada del sistema lagunar La Punta - La Brava, mediante el índice espectral MNDWI\_2, para el año 1985 (amarillo) y el año 2019 (naranja), para el período seco.

El descenso observado en la superficie del espejo de agua del sistema lagunar La Punta - La Brava se puede deber a diferentes factores. Estudios realizados en otros sistemas acuáticos, han indicado que variaciones en el espejo de agua se pueden explicar producto de efectos climáticos prolongados, o bien recurrentes, como sequías (Wang *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2021; Feng *et al.*, 2022). Ji y Gong (2018), señalan que los cambios en términos de la superficie del espejo de agua pueden ser abruptos o de efecto desfasado en varios meses, dependiendo de la dinámica ecológica de cada sistema. Los efectos del clima también se han evidenciado en el comportamiento errático de la superficie del espejo de agua en sistemas lagunares desérticos, como Laguna Santa Rosa en la región de Atacama. No obstante, se observó que los eventos intensos de precipitación han sido capaces de generar cambios abruptos en las tendencias de disminución de la superficie con agua (Ayaz y Sepúlveda, 2022), situación que no se observó en el sistema La Punta-La Brava.

A lo anterior, también se pueden sumar los cambios en la morfología de las lagunas insertas en salares, producto de las dinámicas de crecimiento y expansión de las evaporitas debido a procesos de ascenso capilar, tal como se registra en los sistemas lagunares La Isla, Agua

Amarga, Pajonales, Lastarrias y Salar Grande, entre otros; todos presentes en la región de Antofagasta (Ruch *et al.*, 2012). Sobre este último punto, las dinámicas propias de estos sistemas lagunares también se pueden derivar y/o catalizar de las condiciones geológicas de las lagunas, la calidad de las aguas y la presencia de estructuras microbiológicas, tal como se describe en el caso del Salar de Llamara (Oehlert *et al.*, 2022). Autores como Karaman (2021), además, señalan que estas estructuras microbiológicas podrían incidir (y ser afectadas) en las dinámicas hidrológicas de las lagunas, al generar estructuras que segreguen o combinen sub-cuerpos de agua, pudiendo en consecuencia alterar la morfología y la superficie del espejo de agua.

No obstante, los sistemas freátogénicos, como el sistema lagunar La Punta-La Brava, también podría responder a los efectos de las extracciones de agua próximas. Estudios desarrollados por Ayaz y Sepúlveda (2022) en Laguna Santa Rosa, mostraron tendencias de descensos en la superficie del espejo de agua, producto de la extracción de agua subterránea para fines industriales. Pese a ello, los datos señalan que las tendencias de descenso son reversibles al recibir eventos intensos de precipitación. Esta situación también se evidencia en otros sistemas acuáticos presentes en zonas áridas como en los lagos de la cuenca de Gonghe, China (Wu *et al.*, 2016); el sistema del lago Urmia en Irán (Hosseini-Moghari *et al.*, 2018; Bozorg-Haddad *et al.*, 2022). También en sistemas lagunares de entornos templados como los cuerpos de agua presentes en las provincias de Hunan (Feng *et al.*, 2022) y Jiangsu (Li *et al.*, 2021), ambos en China.

El bombeo de salmuera en el extremo sur del Salar de Atacama comenzó en 1984, y hasta 1994, el volumen bombeado no excedía  $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; sin embargo, de 1994 a 2009, las tasas bombeadas alcanzaron valores entre  $0.50$  y  $1.00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; y desde 2010 hasta la actualidad, han superado los  $1.50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , esperándose un aumento mayor en los próximos años que alcanzaría  $>2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; y que podrían explicar las diferentes tendencias de descenso observadas en La Punta - La Brava (Marazuela *et al.*, 2020). Esto ha generado descensos del nivel freático que avanza de norte a sur y de oeste a este, profundizando entre  $0.00$  y  $0.50$  m en el sector donde se emplaza el sistema lagunar La Punta - La Brava (Marazuela *et al.*, 2020); que para lagunas someras y freatogénicas puede ser determinante (Colburn, 2008; Harris, 2008; Melak, 2008).

Por otra parte, y en cuanto a precisión de los resultados obtenidos, se evidenció una mejora en cuanto a la utilización de umbrales óptimos, en comparación a la utilización del valor 0 como punto de separación entre píxeles de agua y no agua (Karaman, 2021). Sin embargo, al aumentar la resolución de las imágenes satelitales, los resultados extraídos mediante la aplicación de índices espectrales, u otros métodos de procesamiento y extracción de información, como los vectores soporte, son más cercanos a la realidad, por lo que la información estimada es más precisa y certera para la toma de decisiones, por lo que se recomienda utilizar series de mayor resolución que las imágenes Landsat empleadas en este estudio (Sol *et al.*, 2014; Veneros *et al.*, 2020; Albermale, 2021).

## CONCLUSIONES

En la presente memoria se estimó el comportamiento multitemporal de las lagunas La Punta y La Brava, durante el período comprendido entre 1985 y 2019, tanto para la época húmeda (marzo), como para la época seca (septiembre), mediante el uso de herramientas de sensores remotos y sistemas de información geográfica. El comportamiento multitemporal del sistema lagunar La Punta y La Brava indica una oscilación con respecto a la superficie de las lagunas, desde 1985 hasta 2019. Sin embargo, la tendencia que se observa, al analizar las series temporales estimadas, es una marcada disminución en el espejo de agua, tanto en la época húmeda como en la época seca, sobre todo en los últimos años estudiados. El 2019, específicamente, en la época seca, se observa un aumento en la superficie de las lagunas, lo que es considerado como una anomalía con respecto al resto de la serie temporal de superficies, en hectáreas, de las lagunas La Punta y La Brava.

El uso de umbrales óptimos en la separación de píxeles de agua y no agua, a través del método de índices espectrales, en imágenes satelitales, permitió una cuantificación más precisa de superficies que al utilizar umbrales estándar obtenidos por revisión bibliográfica, como el 0, ya que estos se ajustan de mejor manera a las condiciones geográficas propias del área en estudio y a las características de las imágenes que se están utilizando, minimizando las sub o sobreestimaciones con respecto a la superficie lagunar.

La precisión obtenida con el uso de umbrales óptimos, en la estimación de áreas de cuerpos de agua, con el uso de imágenes satelitales de alta resolución permitiría una mejor estimación, y una oportunidad de mejora para quienes repliquen el método planteado en la presente memoria, ya que el software ImageJ detecta de manera automática umbrales óptimos para cada imagen, por lo que al aumentar la resolución de las imágenes satelitales empleadas, aumentaría también la precisión del umbral de corte.

Entre los índices estudiados, el de mejor desempeño fue MNDWI\_2, con variaciones de 1,98% y 8,26% entre las superficies observadas y estimadas en el período húmedo y seco, respectivamente. Al utilizar el índice MNDWI\_2 entre 1985-2019, fue posible observar variaciones interanuales en los cuerpos de agua, con marcada tendencia a la baja desde el año 2002 en adelante. Este resultado fue consistente tanto en época húmeda como en época seca y arrojó una disminución del espejo de agua del -49,48% y del -57,96%, respectivamente, al comparar las áreas estimadas en 1985 y 2019.

La variación en la superficie del sistema lagunar La Punta – La Brava puede deberse a múltiples factores, entre ellos, efectos del clima tales como sequía recurrente, eventos de precipitación intensa que alteren las dinámicas hidrológicas locales u oscilaciones de los anteriores. Cambios en la morfología de las lagunas insertas en salares, producto de las dinámicas de crecimiento y expansión de las evaporitas; calidad de sus aguas y alteraciones en los sedimentos que generen cambios de estimación mediante sensores remotos. No obstante, en los últimos años, la variación del cuerpo de agua también pudo estar relacionada

al descenso freático producto de las extracciones de salmuera que se han realizado en el extremo sur del salar de Atacama desde el año 1984 hasta la actualidad.

El desarrollo de la presente memoria complementa los actuales esfuerzos de monitoreo que se realizan en el sistema lagunar La Punta – La Brava, ecosistema con permanente presión antrópica, principalmente por parte de la gran industria, por lo que es relevante conocer, a través de una representación espacio-temporal, la variación de este tipo de cuerpos de agua y cuál es la tendencia en cuanto a superficie de espejo de agua.

## BIBLIOGRAFÍA

Acharya, T., Subedi, A y Lee, D. (2018). Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal. *Sensors*, 18, 2580-2595.

Adam, E., Mutanga, O., Odindi, J. & Abdel-Rahman, E. (2014). Land-use/cover classification in a heterogeneous coastal landscape using RapidEye imagery: evaluating the performance of random forest and support vector machines classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 35(10), 3440-3458.

Aguirre, R. (2015). Análisis espectral del Lago de Guadalupe, mediante imágenes de satélite y datos *in situ*. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.*, 86, 15-24.

Ahumada, C. (2014). *Caracterización hidrogeológica e hidroquímica del sector sur del Salar de Atacama, II° región de Antofagasta, Chile*. Tesis para optar al grado de Magister en Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Málaga, España: Facultad de Geología, Universidad de Málaga. 101 p.

Alaniz, A. (2014). *Análisis de los cambios en la cobertura de los ecosistemas de la zona central de Chile (regiones V, RM y VI) asociado a dinámicas de uso de suelo*. Memoria para optar al título profesional de Geógrafo. Santiago, Chile: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. 136 p.

Albemarle. (2021). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016). Superficie cubierta por lagunas. Albemarle Limitada. 134 p.

Aponte, J. (2018). *Dinámica de cambios superficiales en humedales cordillera La Viuda-Perú, mediante índices espectrales y modelo digital de elevación, período 1985-2016*. Tesis de grado para optar al título de Magister en Geomática. Bogotá, Colombia: Facultad Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. 124 p.

Aponte, J. y Ospina. J. (2019). Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales alto andinos. *Revista de teledetección*, 53, 59-72.

Araya, D. (2021). Metodología para validar la estimación de cuerpos de agua. Santiago, Chile: Fundación Bionostra. 14 p.

Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de productos Landsat 8 LDCM. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 46 p.

Ayaz, M. & Sepúlveda, R. (2022). Environmental degradation through mining for energy resources: The case of the shrinking Laguna Santa Rosa wetland in the Atacama Region of Chile. *Energy Geoscience*, 3, 182-190.

Baig, M., Zhang, L., Shuai, T. & Q. Tong. (2014). Derivation of a tasseled cap transformation based on landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters*, 5(5), 423–431.

Balbontín, C., Odi, M., Poblete, R., Garrido, J., Campos, I. y Calera, A. (2016). Uso de herramientas de teledetección y SIG para el manejo del riego en los cultivos. (Bol. Tec. N° 335), Centro Regional de Investigación Intihuasi, INIA, Ministerio de Agricultura. La Serena, Chile: INIA.

Barajas, C. (2020). *Análisis de la variabilidad espacio - temporal de humedales en la ciudad de Bogotá a través de índices espectrales, como herramienta de monitoreo y gestión del recurso hídrico*. Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia. 118 p.

Barrera, S. (2011). *Análisis del nivel hídrico y las condiciones del humedal de la laguna de Batuco*. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Santiago, Chile: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. 212 p.

Barrick Zaldivar. (2015). Informe mensual nivel agua pozos Callejón Tilopozo y Lagunas salar de Atacama. 11 p.

Bedoya, M. (2015). *Análisis del cambio de la cobertura entre 1999 y 2015 del páramo de chiles-cumbal a través de la utilización de herramientas de SIG*. Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica. Manizales, Colombia: Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales de Colombia. 76 p.

Benavides, C y Sinclair. D. (2014). Inserción capitalista en un oasis atacameño. Peine tradición minera y gran minería en la Cuenca del Salar de Atacama.

Berdugo, A. y Reales, G. (2016). *Análisis multitemporal de imágenes satelitales para evaluar variaciones espacio – temporales en la calidad del agua del embalse El Guájaro, Atlántico*. Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Ambiental. Barranquilla, Colombia: Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de La Costa. 72 p.

Bocco, M., Sayago, S., Violini, S. y Willington, E. (2015). Modelos simples para estimar rendimientos de cultivos agrícolas a partir de imágenes satelitales: una herramienta para la planificación. *Tecnología y Sociedad*, 4, 26-35.

Bolados, P. (2014). Los conflictos etnoambientales de “Pampa Colorada” y “El Tatio” en el Salar de Atacama, Norte de Chile. Procesos étnicos en un contexto minero y turístico transnacional. *Estudios atacameños*, 48, 229-248.

- Bolados, P. y Babidge, S. (2017). Ritualidad y extractivismo. La limpia de canales y las disputas por el agua en el salar de Atacama – Norte de Chile. *Estud. Atacam.* 54, 201-216.
- Bozorg-Haddad, O., Dehghan, P., Zolghadr-Asli, B., Singh, V., Chu, X. & Loáiciga, H. (2022). System dynamics modeling of lake water management under climate change. *Scientific Reports*, 12, 1-17.
- Bravo, P. (2021). *Estudio hidráulico de aguas subterráneas de la zona del Monturaqui, salar de Atacama, Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 96 p.
- Bremer, M., Lozano, D., Rodríguez, M. y Hori, M. (2015). Caracterización de niveles de contaminación en una planta extractora de azufre utilizando imágenes de satélite de alta resolución para optimizar el plan de muestreo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(2), 1-16.
- Brown, O., Gallardo, Y., Correa, A. y Barrios, S. (2015). El cambio climático y sus evidencias en las precipitaciones. *Ingeniería hidráulica y comercial*, 36(1), 88-101.
- Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Altesor, A., Delibes, M., Baeza, S. y Liras, E. (2008). Funcionamiento ecosistémico y evaluación de prioridades geográficas en conservación. *Ecosistemas*, 17(3), 53-63.
- Casal, G. (2022). Assessment of Sentinel-2 to monitor highly dynamic small water bodies: The case of Louro lagoon (Galicia, NW Spain). *Oceanología*, 64, 88-102.
- Castillo, I. y Rodríguez, M. (2017). Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna de Fúquene. *Mutis*, 7(1), 20-33.
- Cazenave, G. y Vives, L. (2014). Predicción de inundaciones y sistemas de alerta: Avances usando datos a tiempo real en la cuenca del arroyo del Azul. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 33, 83-91.
- Chávez, P. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- Chuvieco, E. (2008). Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Barcelona, España: Editorial Ariel.
- Chuvieco, S. (1995). Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones Rialp. Madrid, España.

Comité de Minería No Metálica. (2018). Proyecto Corfo. Estudio de un modelo conceptual ecológico para la cuenca del salar de Atacama. Informe 3: Modelo Conceptual Ecológico (MCE) de la cuenca del salar de Atacama. Amakáik Consultoría.

Colburn, E. (2008). Temporary Waters. Pp. 427-439. In: S.E. Jørgensen (ed.). *Ecosystem Ecology*. Elsevier B.V. Amsterdam, The Netherlands.

Cornellà, O., Salas, J., Aravena, R., Guzmán, E., Guimerà, J., Tore, C., von Igel, W., Henríquez, A. y Fock, A. (2009). Hidrogeología de los sistemas lagunares del margen E del salar de Atacama. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Costanza, R., Groot, R. & Sutton, P. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Glob Env Change Hum Policy Dimen.*, 26, 152-158.

Crist, E. (1985). A TM Tasseled Cap Equivalent Transformation for Reflectance Factor Data. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 301-306.

Dirección General de Aguas. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca Salar de Atacama. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Antofagasta, Chile. 84 p.

Dirección General de Aguas. 2014a. Diagnóstico y sistematización de información de planes de alerta temprana vigentes con condicionamiento de derechos. Cuenca Salar de Atacama. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. 556 p.

Dirección General de Aguas. 2014b. Análisis de los mecanismos de evaporación y evaluación de los recursos hídricos del salar de Atacama. Informe final. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Antofagasta, Chile. 323 p.

Dixon, M., Loh, J. y Davidson, N. (2016). Tracking global change in ecosystem area: the Wetland Extent Trends index. *Biol Conserv.*, 193, 27-35.

Domínguez-Segarra, M., Campo, S y Salva-Catarineu, M. (2018). Rectificación Geométrica, Corrección Atmosférica y Topográfica en la Isla de El Hierro (Islas Canarias) con imagen de satélite GeoEye-1. *Tecnologías de la Información Geográfica: Perspectivas multidisciplinares en la sociedad del conocimiento. XVIII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*. Universitat de Valencia: 212-221.

Duarte, C. (2006). Escenarios de cambio global (Cap. 7, pp. 88-100). En: *Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Cyan, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A. 165 p.

Espinosa, M., Orellana, L., Alegría, D. y Ortiz, G. (2011). Análisis multitemporal de cambios ocurridos en humedales utilizando imágenes satelitales período 1984-2011. Centro de Información de Recursos Naturales, Chile. 47 p.

Eugenio, F., Marcello, J., Martin, J. y Rodríguez-Esparragón, D. (2017). Benthic habitat mapping using multispectral high-resolution imagery: evaluation of shallow water atmospheric correction techniques. *Sensors*, 17(11), 2627-2639.

Feng, S., Liu, S., Zhou, G., Gao, C., Sheng, D., Yan, W., Wu, Y., Gao, H., Jia, J., Wang, Z., Ning, Y., Ren, D. y Liu, M. (2022). Long-term dense Landsat observations reveal detailed waterbody dynamics and temporal changes of the size-abundance relationship. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 1-14.

Feyisa, G., Meilby, H., Fensholt, R. y Proud, S. (2014). Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.*, 140, 23-35.

Fonkén, M. (2014). Introducción a los bofedales de la región Altoandina Peruana. *Mires and Peat*, 15(5), 1-13.

Freemantle, V., Freemantle, F., Atkinson, D. y Treitz, P. (2021). A High Spatial Resolution Satellite Remote Sensing Time Series Analysis of Cape Bounty, Melville Island, Nunavut (2004-2018). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 46(11), 1-26.

Gestión Ambiental Consultores. (2009). Capítulo 5. Línea de Base. EIA Modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el salar de Atacama. Antofagasta, Chile. 181 p.

García, E. y Otto, M. (2015). Caracterización ecohidrológica de humedales altoandinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del río Santa, Ancash, Perú. *Ecología Aplicada*, 14(2), 115-125.

Ge, G., Shi, Z., Zhu, Y., Yang, X., y Hao, Y. (2020). Land use/cover classification in an arid desert-oasis mosaic landscape of China using remote sensed imagery: Performance assessment of four machine learning algorithms. *Global Ecology and Conservation*, 22, 1-13.

GeoEye, (2011). GeoEye Imagery Products. Herndon, Virginia. United States. 4 p.

González, A. (2018). *Desarrollo de una aplicación para la reparación de huecos (Gapfilling) de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+*. Trabajo para obtener el grado de Maestro en Sistemas Computacionales. Jalisco, México: Departamento de Electrónica, Sistemas e Informática, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. 48 p.

Gundermann, H. y Göbel, B. (2018). Comunidades indígenas, empresas del litio y sus relaciones en el salar de Atacama. *Chungará (Arica)*, 50(3), 471-486.

Harris, G. (2008). Lagoons. Pp. 296-303. In: S.E. Jørgensen (ed.). *Ecosystem Ecology*. Elsevier B.V. Amsterdam, The Netherlands. 521 p.

Hosseini-Moghari, S., Araghinejad, S., Tourian, M., Ebrahimi, K. y Döll, P. (2018). Quantifying the impacts of human water use and climate variations on recent drying of Lake Urmia basin: the value of different sets of spaceborne and in-situ data for calibrating a hydrological model. *Hidrology and Earth System Sciences Discussions*, 1, 1-29

Huete, A. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of the Environment*, 25, 295-309.

Infraestructura de Datos Geoespaciales. (2021). Información territorial. Aguas continentales. Ministerio de Bienes Nacionales.

Insaurralde, J. (2019). Aplicación de la transformación Tasseled Cap en la generación de información telemática a partir de las imágenes satelitales del Landsat 8 (OLI). *Geofocus*, 24, 19-35.

Jara, C. (2022). *Estudio integral de humedales altoandinos (Andean peatlands) con Teledetección y SIG*. Memoria para optar al grado de Doctor en Teledetección. Valencia, España: Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universidad de Valencia. 153 p.

Ji, L. y Gong, P. (2018). Surface water. Pp. 258-294. In: S. Liang (ed.). *Comprehensive Remote Sensing*. Elsevier B.V. Maryland, United States of America. 3134 p.

Karaman, M. (2021). Comparison of thresholding methods for shoreline extraction from Sentinel-2 and Landsat-8 imagery: Extreme Lake Salda, track of Mars on Earth. *Journal of Environmental Management*, 298, 1-20.

Kauth, R. y Thomas, G. (1976). The Tasselled Cap — A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. *LARS Symposia*, papel 159.

Ko, B., Kim, H. y Nam, Y. (2015). Classification of potential water bodies using Landsat 8 OLI and combination of two boosted random forest classifiers. *Sensors*, 15(6), 13763-13777.

Kohavi, R. (1995). A study of Cross Validation and Bootstrap for Accuracy estimation and Model selection. Appears in the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI).

Kuester, M. (2017). Absolute Radiometric Calibration. DigitalGlobe. 8 p.

- Li, Z., Liu, M., Hu, Y., Xue, Z. y Sui, J. (2020). The spatiotemporal changes of marshland and the driving forces in the Sanjiang Plain, Northeast China from 1980 to 2016. *Ecological Processes*, 9(24), 1-13.
- Li, L., Su, H., Du, Q. y Wu, T. (2021). A novel surface water index using local background information for long term and large-scale Landsat images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 172, 59–78.
- López, E., Bocco, B. y Mendoza, M. (2001). Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones Geográficas*, 45, 56-76.
- Luebert, F. y Pliscoff, P. (2006). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 310 p.
- Macedo-Cruz, A., Pajares-Martinsanz, G. y Santos-Peñas, M. (2010). Clasificación no supervisada con imágenes a color de cobertura terrestre. *Agrociencia*, 44, 711-722.
- Manzano, A. (2017). Introducción a los modelos de ecuaciones estructurales. *Inv Ed Med.*, 7(25), 67-72.
- Marazuela, M., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C. y García-Gil, A. (2020). Towards more sustainable brine extraction in salt flats: Learning from the Salar de Atacama. *Science of the Total Environment*, 703, 1-18
- Marín, V., Delgado, L. y Vila, I. (2006). Sistemas acuáticos, ecosistemas y cuencas hidrográficas. pp. 13-20. En: Vila I, A Veloso, R Schlatter y C Ramírez (eds) *Macrófitas y vertebrados de los sistemas límnicos de Chile*. Editorial Universitaria. Santiago, Chile.
- Martínez, D. y Pinto, D. (2018). *Evaluación de la pérdida del espejo de agua en la laguna de Suesca a través de imágenes satelitales*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Ambiental y Sanitaria. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle. 88 p.
- McFeeters, S. (1996). The use of the normalized difference water index (ndwi) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425–1432.
- Menéndez, M. y Núñez, N. (2012). El uso de los sensores remotos en los recursos naturales. Segunda Parte: Teledetección. Salta, Argentina: Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo. 96 p.
- Merino, F. (1996). *Determinación de zonas de riesgo de incendios forestales. Cuencas de Aconagua y Marga – Marga*. Memoria para optar al título profesional de Geógrafo.

Santiago, Chile: Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Geografía. Universidad de Chile. 150 p.

Minera Escondida. (2013). Monitoreo de las condiciones hídricas del sector sur del salar de Atacama, vegas de Tilopozo y lagunas La Punta y La Brava, invierno de 2013. Centro de Ecología Aplicada Ltda. Antofagasta, Chile. 43 p.

Ministerio del Medio Ambiente. (2011). Guía para la conservación y seguimiento ambiental de humedales altoandinos. Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 50 p.

Ministerio del Medio Ambiente. (2012). Descripción metodológica. Actualización catastro de ecosistemas acuáticos continentales. CEA Consultoría. 42 p.

Ministerio del Medio Ambiente. (2015). Diagnóstico y gestión ambiental integrada de humedales altoandinos. Gobierno de Chile. Antofagasta, Chile. 408 p.

Ministerio de Obras Públicas. (2014). Análisis de los mecanismos de evaporación y evaluación de los recursos hídricos del salar de Atacama. Dirección General de Aguas, Gobierno de Chile. Antofagasta, Chile. 323 p.

Muñoz, J., Mardones, L., y de Vidts-Sabelle, P. (2004). Funcionamiento hidrológico del acuífero del núcleo del salar de Atacama. *Ingeniería hidráulica en México*, 19(3), 69-81.

Mustafa, M., Hassoon, K., Hussain, H. y Abd, M. (2017). Using water indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI and AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Research- GRANTHAALAYAH*, 5(10), 117-128.

Núñez, R., Aguirre, C., Soto, J., Salinas, P., Salinas, C., Prieto, H. et al. (2020). Physicochemical Parameters Affecting the Distribution and Diversity of the Water Column Microbial Community in the High-Altitude Andean Lake System of La Brava and La Punta. *Microorganisms*, 8(8), 1181-1205.

Oehlert, A., Suosaari, E., Kong, T., Piggot, A., Maizel, D., Lascu, I., Demergasso, C., Chong, G. y Reid, P. (2022). Physical, chemical, and microbial feedbacks controlling brine geochemistry and lake morphology in polyextreme salar environments. *Science of the Total Environment*, 836, 1-19.

Otto, M., Scherer, D. y Richters, J. (2011). Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1713–1727.

Oyola, N. (2009). *Identificación de humedales del Norte Grande de Chile utilizando técnicas geomáticas en imágenes satelitales Landsat*. Tesis de grado para optar al título de Magister

en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. 48 p.

Ozesmi, S. y Bauer, M. (2002). Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands ecology and management*, 10(5), 381–402.

Palacios, O. y Escobar, B. (2016). La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(2), 5-16.

Pardo-Pascual, J., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. y Palomar-Vásquez, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with sub-pixel precision. *Remote Sens. Environ.*, 123, 1-11.

Parra, J., Sobrino, J., Acevedo, P. y Morales, L. (2006). Estimación de la temperatura de suelo desde datos satelitales AVHRR-NOAA aplicando algoritmos de Split window. *Investigación*, 52(3), 238-245.

Passucci, V., Carmona, F. y Rivas, R. (2017). Identificación de zonas anegadas y no anegadas mediante técnicas de teledetección. *Revista Estudios Ambientales*, 5(2), 1-12.

Picone, N. (2017). Comparación de imágenes satelitales Sentinel 2 y Landsat 8 en el estudio de áreas urbanas. Congreso Nacional de Geografía de Universidades Nacionales, Chaco, Argentina. 10 p.

Podger N., Colwell, W. y Taylor, M. (2011). GeoEye-1 Radiance at Aperture and Planetary Reflectance. *GeoEye*. 5 p.

Ponce, B. (2010). *Detección y análisis del cambio del uso del suelo en la zona centro-norte de la provincia de Capitán Prat, XI Región período 1984-2003*. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile: Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile. 62 p.

Prasad, P., Joseph, V., Chandra, P. y Kotha, M. (2022). Evaluation and comparison of the Earth observing sensors in land cover/land use studies using machine learning algorithms. *Ecological Informatics*, 68, 1-13.

Randazzo, G., Barreca, J., Casio, M., Crupi, A., Fontana, M. y Gegrório, F., et al. (2020). Analysis of very high spatial resolution images for automatic shoreline extraction and satellite-derived bathymetry mapping. *Geosciences*, 10(5), 172-190.

Rey, D. (2020). *Análisis multitemporal del área correspondiente a la Laguna de Tota para el periodo 1989 – 2019*. Trabajo de grado para optar al título de Especialización en Sistemas de Información Geográfica. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería, Universidad Antonio Nariño. 62 p.

Roa, J. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. *Revista geográfica venezolana*, 48(2), 183-219.

Rockwood Lithium. (2016). 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). Determinación espacio temporal de cuerpos de agua en el salar de Atacama. Cedrem Consultoría. 59 p.

Romero, H., Videla, A. y Gutiérrez, F. (2017). Explorando conflictos entre comunidades indígenas y la industria minera en Chile: las transformaciones socioambientales de la región de Tarapacá y el caso de Lagunillas. *Estudios atacameños*, 55, 231-250.

Romero, H., Smith, P., Mendoga, M. y Méndez, M. (2013). Macro y meso climas del altiplano andino y desierto de Atacama: desafíos y estrategias de adaptación social ante su variabilidad. *Revista de Geografía Norte Grande*, 55, 19-41.

Rouse, J., Haas, R., Schell, J. y Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317.

Ruch, J., Warren, J., Risacher, F., Walter, T. y Lanari, R. (2012). Salt lake deformation detected from space. *Earth and Planetary Science Letters*, 331-332: 120-127.

Salamanca, M. (2018). *Análisis multitemporal sobre la pérdida del Espejo de agua sobre el humedal laguna La Herrea por efectos antrópicos asociados a la minería*. Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialización en planeación ambiental y manejo integral de los recursos naturales. Bogotá, Colombia: Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada. 29 p.

Saldaña, M. (2011). *Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes GeoEye-1*. Trabajo para optar a Máster en Representación y Diseño en Ingeniería y Arquitectura. Almería, España: Escuela de Postgrado de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Almería. 39 p.

Saldaña, M. (2013). *Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes de los satélites GeoEye-1 y WorldView-2*. Memoria para optar al grado de Doctor. Almería, España: Departamento de Ingeniería, Universidad de Almería. 241 p.

Sanabria, J., Archila, J. y Bautista, L. (2010). Discriminación de usos del suelo a partir de imágenes multiespectrales. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(16), 100-107.

Sánchez-Sánchez, Y., Quirós, E., Durán-Barroso, P. y Martínez-Graña, A. (2019). Selección del umbral óptimo para la separación de la lámina de agua del embalse Jerte-Plasencia a partir de Sentinel-1. *Teledetección: hacia una visión global del cambio climático*, 501-504.

Santana, L., Escobar, L. y Capote, P. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de geografía Norte Grande*, 45, 77-95.

Sarp, G. y Ozcelik, M. (2017). Water body extraction and change detection using times series: A case study of Lake Burdur, Turkey. *Journal of Taibah University of Science*, 11, 381-391.

Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M. y Pietzsch, T., et al. (2012). Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, 9, 676-682.

Servicio de Evaluación Ambiental. (2014). Informe Consolidado 5 de Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones y/o Ampliaciones a la Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto "EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama". 17p.

Soluciones en Gestión Ambiental. (2015). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el salar de Atacama. Apéndice B: "Determinación espacio temporal de la vegetación azonal y cuerpos de agua. Salar de Atacama". 42 p.

Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos. 2016. Antecedentes climáticos II Región de Antofagasta. Centro de Información de Recursos Naturales. Antofagasta, Chile. 11 p.

Sol, F., Zhao, Y., Gong, P., Ma, R. y Dai, Y. (2014). Monitoring dynamic changes of global land cover types: fluctuations of major lakes in China every 8 days during 2000 – 2010. *Chinese Science Bulletin*, 59(2), 171-189.

Solovey, T. (2019). An analysis of flooding coverage using remote sensing within the context of risk assessment. *Geologos*, 25 (3), 241-248.

Soto, J., Román-Figueroa, C. y Paneque, M. (2019). A model for Estimating the Vegetation Cover in the High-Altitude Wetlands of the Andes (HAWA). *Land*, 8(20), 1-17.

Tan Z., Li, Y., Zhang, Q., Guo, Y., Wang, X., Li, B., et al. (2022). Progress of hydrological process researches in lake wetland: A review. *J. Lake*, 34(1), 18-37.

Thuillier, G., Hersé, M., Labs, D., Foujols, T., Peetermans, W., Gillotay, D., Simonds, P. C. y Mandel, H. (2003). The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the solspec spectrometer from the Atlas and Eureka missions. *Solar Physics* 214, 1-22.

- Toro, G. y Melo, C. (2009). Aplicación de métodos de interpolación geoestadística para la predicción de niveles digitales de una imagen satelital con líneas perdidas y efectos sal y pimienta. *Tecnura*, 12(24), 55-67.
- Uribe, E. (2015). El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Santiago, Chile: Naciones Unidas y Comisión Económica para América Latina y el Caribe. 86 p.
- Urquia, J. (2018). Comparación de métodos de clasificación supervisada y no supervisada entre paquetes de procesamiento digital de imágenes. Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE), Unidad de Observación de la Tierra, Dirección de Aplicación Espaciales. 15 p.
- United States Geological Survey. (2020). Earth-Explorer: download images. Department of the Interior, United States.
- Valencia M. y Figueroa, A. (2015). Vulnerabilidad de humedales altoandinos ante procesos de cambio: tendencias del análisis. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 29-42.
- Vargas, O. (2011). Restauración ecológica: Biodiversidad y conservación. *Acta biol. Colomb.*, 16(2), 221-246.
- Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M y López-Morales, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *Idesia*, 38(4), 99-107.
- Venini, F. (2012). *Restitución digital de imágenes satelitales GeoEye-1*. Tesis para optar al título de Ingeniero en Agrimensura, Buenos Aires, Argentina: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. 214 p.
- Wang, M. (2010). Atmospheric correction for remotely - sensed ocean-colour products. Reports and Monographs of the International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG), 10. IOCCG: Dartmouth. 78 p.
- Wang, X., Xie, S., Zhang, X., Chen, C., Guo, H., Du, J. y Duan, Z. (2018). A robust Multi-Band Water Index (MBWI) for automated extraction of surface water from Landsat 8 OLI imagery. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*, 68, 73–91.
- Wu, D., F. Chen, K. Li, Y. Xie, J. Zhang & A. Zhou. (2016). Effects of climate change and human activity on lake shrinkage in Gonghe Basin of northeastern Tibetan Plateau during the past 60 years. *J Arid Land*, 8 (4): 479–491.

Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens*, 27: 3025-3033.

Yarad, J. (2018). *Estimación de la distribución espacial de evapotranspiración usando imágenes satelitales de temperatura de suelo. Validación en la cuenca alta del río Elqui*. Memoria de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Santiago Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 97 p.

Zeballos, G., Soruco, A., Cusicanqui, D., Joffré, R. y Rabatel, A. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 49(3), 14-26.

Zhai, K., Wu, X., Qin, Y. y Du, P. (2015). Comparison of surface water extraction performances of different classic water indices using OLI and TM imageries in different situations. *Geo-spatial Information Science*, 18 (1), 32-42.

Zhang J., Ding, J., Wu, P., Tan, J., Huang, S., Teng, D., Cao, X., Wang, J. y Chen, W. (2020). Assessing arid Inland Lake Watershed Area and Vegetation Response to Multiple Temporal Scales of Drought Across the Ebinur Lake Watershed. *Scientific reports*, 10, 1354-1371.

Zhu, Z., Fu, Y., Woodcock, C., Olofsson, P., Vogelmann, J., Holden, C., Wang, M., Dai, S. & Yu, Y. (2016). Including land cover change in analysis of greenness trends using all available Landsat 5, 7, and 8 images: A case study from Guangzhou, China (2000–2014). *Remote Sensing of Environment*. 185, 243–257.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Datos imágenes satelitales Landsat utilizados en estudio multitemporal

N°	Fecha	Época	Satélite	Nombre	N°	Fecha	Época	Satélite	Nombre
<b>1</b>	25-01-1985	Húmeda	L5 TM	LT52330761985025XXX03	<b>34</b>	18-09-2001	Seca	L5 TM	LT52330762001261CUB00
<b>2</b>	05-08-1985	Seca	L5 TM	LT52330761985217XXX04	<b>35</b>	29-03-2002	Húmeda	L5 TM	LT52330762002088COA00
<b>3</b>	02-04-1986	Húmeda	L5 TM	LT52330761986092AAA08	<b>36</b>	08-09-2003	Seca	L5 TM	LT52330762003251CUB00
<b>4</b>	09-09-1986	Seca	L5 TM	LT52330761986252AAA03	<b>37</b>	18-03-2004	Húmeda	L5 TM	LT52330762004078CUB00
<b>5</b>	04-03-1987	Húmeda	L5 TM	LT52330761987063AAA07	<b>38</b>	26-09-2004	Seca	L5 TM	LT52330762004270CUB00
<b>6</b>	30-10-1987	Seca	L5 TM	LT52330761987303CUB00	<b>39</b>	05-03-2005	Húmeda	L5 TM	LT52330762005064COA00
<b>7</b>	06-03-1988	Húmeda	L5 TM	LT52330761988066CUB00	<b>40</b>	29-09-2005	Seca	L5 TM	LT52330762005272CUB00
<b>8</b>	30-09-1988	Seca	L5 TM	LT52330761988274CUB00	<b>41</b>	08-03-2006	Húmeda	L5 TM	LT52330762006067CUB02
<b>9</b>	25-03-1989	Húmeda	L5 TM	LT52330761989084CUB00	<b>42</b>	16-09-2006	Seca	L5 TM	LT52330762006259COA00
<b>10</b>	17-09-1989	Seca	L5 TM	LT52330761989260CUB00	<b>43</b>	11-03-2007	Húmeda	L5 TM	LT52330762007070CUB00
<b>11</b>	28-03-1990	Húmeda	L5 TM	LT52330761990087CUB00	<b>44</b>	19-09-2007	Seca	L5 TM	LT52330762007262CUB00
<b>12</b>	20-09-1990	Seca	L5 TM	LT52330761990263CUB00	<b>45</b>	13-03-2008	Húmeda	L5 TM	LT52330762008073CUB00
<b>13</b>	15-03-1991	Húmeda	L5 TM	LT52330761991074CUB00	<b>46</b>	21-09-2008	Seca	L5 TM	LT52330762008265CUB00
<b>14</b>	23-09-1991	Seca	L5 TM	LT52330761991266CUB00	<b>47</b>	16-03-2009	Húmeda	L5 TM	LT52330762009075COA02
<b>15</b>	01-03-1992	Húmeda	L5 TM	LT52330761992061CUB00	<b>48</b>	24-09-2009	Seca	L5 TM	LT52330762009267COA02
<b>16</b>	09-09-1992	Seca	L5 TM	LT52330761992253CUB00	<b>49</b>	19-03-2010	Húmeda	L5 TM	LT52330762010078CUB00
<b>17</b>	20-03-1993	Húmeda	L5 TM	LT52330761993079CUB00	<b>50</b>	11-09-2010	Seca	L5 TM	LT52330762010254CUB00
<b>18</b>	14-10-1993	Seca	L5 TM	LT52330761993287CUB00	<b>51</b>	22-03-2011	Húmeda	L5 TM	LT52330762011081CUB00
<b>19</b>	03-02-1994	Húmeda	L5 TM	LT52330761994034CUB00	<b>52</b>	30-09-2011	Seca	L5 TM	LT52330762011273CUB00
<b>20</b>	17-10-1994	Seca	L5 TM	LT52330761994290CUB00	<b>53</b>	12-04-2013	Húmeda	L8 OLI	LC82330762013102LGN02
<b>21</b>	26-03-1995	Húmeda	L5 TM	LT52330761995085CUB00	<b>54</b>	03-09-2013	Seca	L8 OLI	LC82330762013246LGN01
<b>22</b>	18-09-1995	Seca	L5 TM	LT52330761995261CUB00	<b>55</b>	14-03-2014	Húmeda	L8 OLI	LC82330762014073LGN01
<b>23</b>	28-03-1996	Húmeda	L5 TM	LT52330761996088CUB00	<b>56</b>	22-09-2014	Seca	L8 OLI	LC82330762014265LGN01
<b>24</b>	20-09-1996	Seca	L5 TM	LT52330761996264CUB02	<b>57</b>	17-03-2015	Húmeda	L8 OLI	LC82330762015076LGN01
<b>25</b>	11-02-1997	Húmeda	L5 TM	LT52330761997042CUB00	<b>58</b>	25-09-2015	Seca	L8 OLI	LC82330762015268LGN01

<b>26</b>	07-09-1997	Seca	L5 TM	LT52330761997250CUB01	<b>59</b>	19-03-2016	Húmeda	L8 OLI	LC82330762016079LGN01
<b>27</b>	03-04-1998	Húmeda	L5 TM	LT52330761998093COA00	<b>60</b>	11-09-2016	Seca	L8 OLI	LC82330762016255LGN01
<b>28</b>	10-09-1998	Seca	L5 TM	LT52330761998253COA02	<b>61</b>	22-03-2017	Húmeda	L8 OLI	LC82330762017076LGN00
<b>29</b>	06-04-1999	Húmeda	L5 TM	LT52330761999096CUB00	<b>62</b>	14-09-2017	Seca	L8 OLI	LC82330762017257LGN00
<b>30</b>	29-09-1999	Seca	L5 TM	LT52330761999272COA02	<b>63</b>	09-03-2018	Húmeda	L8 OLI	LC82330762018068LGN00
<b>31</b>	08-04-2000	Húmeda	L5 TM	LT52330762000099CUB00	<b>64</b>	17-09-2018	Seca	L8 OLI	LC82330762018260LGN00
<b>32</b>	15-09-2000	Seca	L5 TM	LT52330762000259CUB00	<b>65</b>	11-03-2019	Húmeda	L8 OLI	LC82330762019071LGN00
<b>33</b>	10-03-2001	Húmeda	L5 TM	LT52330762001069COA00	<b>66</b>	20-09-2019	Seca	L8 OLI	LC82330762019263LGN00

**Apéndice 2 a) Diferencia interanual entre áreas estimadas mediante el índice MNDWI\_2 para el sistema lagunar La Punta – La Brava, período húmedo.**

HÚMEDO			
Periodo	Diferencia (ha)		Diferencia (%)
<b>1985-1986</b>	66,15	66,15	48,84
<b>1986-1987</b>	-47,07	19,08	-53,26
<b>1987-1988</b>	-50,94	-31,86	-136,06
<b>1988-1989</b>	127,35	95,49	77,28
<b>1989-1990</b>	-9,90	85,59	-6,39
<b>1990-1991</b>	-55,35	30,24	-55,61
<b>1991-1992</b>	-30,69	-0,45	-44,58
<b>1992-1993</b>	3,60	3,15	4,97
<b>1993-1994</b>	-16,47	-13,32	-29,42
<b>1994-1995</b>	70,83	57,51	55,86
<b>1995-1996</b>	-66,96	-9,45	-111,88
<b>1996-1997</b>	-28,35	-37,80	-90,00
<b>1997-1998</b>	76,23	38,43	70,76
<b>1998-1999</b>	-6,84	31,59	-6,78
<b>1999-2000</b>	-11,79	19,80	-13,23
<b>2000-2001</b>	-89,10	-69,30	
<b>2001-2002</b>	122,04	52,74	100,00
<b>2002-2003</b>	-122,04	-69,30	
<b>2003-2004</b>	65,61	-3,69	100,00
<b>2004-2005</b>	-8,91	-12,60	-15,71
<b>2005-2006</b>	4,23	-8,37	6,94
<b>2006-2007</b>	-16,47	-24,84	-37,04
<b>2007-2008</b>	5,04	-19,80	10,18
<b>2008-2009</b>	81,81	62,01	62,30
<b>2009-2010</b>	-96,93	-34,92	-281,94
<b>2010-2011</b>	7,65	-27,27	18,20
<b>2011-2013</b>	7,47	-19,80	15,09
<b>2013-2014</b>	-9,72	-29,52	-24,43
<b>2014-2015</b>	-7,20	-36,72	-22,10
<b>2015-2016</b>	2,43	-34,29	6,94
<b>2016-2017</b>	32,40	-1,89	48,06
<b>2017-2018</b>	-29,52	-31,41	-77,91
<b>2018-2019</b>	-2,88	-34,29	-8,23

**Apéndice 2 b) Diferencia interanual entre áreas estimadas mediante el índice MNDWI\_2 para el sistema lagunar La Punta – La Brava, período seco.**

SECO			
Periodo	Diferencia (ha)		Diferencia (%)
<b>1985-1986</b>	55,44	55,44	18,19
<b>1986-1987</b>	-227,34	-171,90	-293,38
<b>1987-1988</b>	71,46	-100,44	47,98
<b>1988-1989</b>	78,39	-22,05	34,48
<b>1989-1990</b>	0,09	-21,96	0,04
<b>1990-1991</b>	-44,01	-65,97	-23,99
<b>1991-1992</b>	70,65	4,68	27,81
<b>1992-1993</b>	-139,68	-135,00	-122,11
<b>1993-1994</b>	7,56	-127,44	6,20
<b>1994-1995</b>	76,68	-50,76	38,60
<b>1995-1996</b>	57,16	6,40	22,35
<b>1996-1997</b>	-86,95	-80,55	-51,50
<b>1997-1998</b>	-32,49	-113,04	-23,83
<b>1998-1999</b>	-14,67	-127,71	-12,06
<b>1999-2000</b>	28,98	-98,73	19,24
<b>2000-2001</b>	-9,00	-107,73	-6,35
<b>2001-2002</b>	-141,66	-249,39	
<b>2002-2003</b>	198,09	-51,30	100,00
<b>2003-2004</b>	-94,68	-145,98	-91,56
<b>2004-2005</b>	9,45	-136,53	8,37
<b>2005-2006</b>	26,91	-109,62	19,25
<b>2006-2007</b>	-35,91	-145,53	-34,58
<b>2007-2008</b>	1,35	-144,18	1,28
<b>2008-2009</b>	-24,84	-169,02	-30,91
<b>2009-2010</b>	8,64	-160,38	9,71
<b>2010-2011</b>	-42,84	-203,22	-92,79
<b>2011-2013</b>	80,37	-122,85	63,51
<b>2013-2014</b>	-63,54	-186,39	-100,86
<b>2014-2015</b>	-8,64	-195,03	-15,89
<b>2015-2016</b>	26,91	-168,12	33,11
<b>2016-2017</b>	-14,85	-182,97	-22,36
<b>2017-2018</b>	-8,28	-191,25	-14,24
<b>2018-2019</b>	46,71	-144,54	44,55