



**INFORME ANUAL N°4**

**Plan de Manejo Biótico**

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

## **ANEXO II**

### **Estado Ecológico del Sistema**

**METODOLOGÍAS Y ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS DE TENDENCIAS DE SUPERFICIE CUBIERTA POR LAGUNAS**



**Región de Antofagasta**

**Septiembre de 2020**

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>5</b>
2.1	Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2019 .....	5
2.2	Obtención de registros NDWI y NDVI de imágenes Landsat 2009-2019 .....	6
2.3	Análisis de tendencias 2009-2019 .....	8
2.4	Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI .....	9
2.5	Análisis de variación espacial 2009-2019 .....	10
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>11</b>
3.1	La Punta y La Brava .....	11
3.1.1	Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2019 .....	11
3.1.2	Análisis de tendencias 2009 - 2019 .....	13
3.1.3	Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI .....	17
3.1.4	Análisis de variación espacial 2009 - 2019 .....	17
3.2	Peine .....	23
3.2.1	Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2019 .....	23
3.2.2	Análisis de tendencias 2009 - 2019 .....	25
3.2.3	Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI .....	29
3.2.4	Análisis de variación espacial 2009 - 2019 .....	29
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>36</b>

## FIGURAS

Figura N°3-1.	Superficies permanentes y no permanentes, sector La Punta y La Brava. ....	11
Figura N°3-2.	Estratos según clasificación de recurrencia, Sector La Punta y La Brava. ....	12
Figura N°3-3.	Diagrama de caja de NDWI y NDVI, por tipos de estratos (permanente – no permanente – otros recubrimientos), en el sector La Punta y La Brava. ....	13
Figura N°3-4.	Tendencias de medianas de los índices NDWI y NDVI, en serie de tiempo 2009/2019. ....	15
Figura N°3-5.	Interpolación de la variación de NDWI, sector la Punta y La Brava .....	19
Figura N°3-6.	Interpolación de la variación de NDVI, sector la Punta y La Brava. ....	20
Figura N°3-7.	Variación del índice NDWI vs. superficies, previo y posterior al proyecto. ....	21
Figura N°3-8.	Variación del índice NDVI vs. superficies, previo y posterior al proyecto. ....	22
Figura N°3-9.	Superficies permanentes y no permanentes, sector Peine. ....	23
Figura N°3-10.	Estratos según clasificación de recurrencia, sector Peine. ....	24

Figura N°3-11. Diagrama de caja de NDWI y NDVI, por tipos de estratos (permanente – no permanente – otros recubrimientos), en el sector Peine. ....	25
Figura N°3-12. Tendencias de medianas de los índices NDVI (arriba) y NDWI (abajo), en serie de tiempo 2009/2019, sector Peine. ....	27
Figura N°3-13. Interpolación de la variación de NDWI, sector Peine. ....	30
Figura N°3-14. Interpolación de la variación de NDVI, Peine. ....	31
Figura N°3-15. Variación del índice NDWI y Superficies pre y post proyecto. ....	32
Figura N°3-16. Variación del índice NDVI vs. superficies pre y post - proyecto. ....	33

## TABLAS

Tabla N°2-1. Características de los sensores Landsat utilizados en el análisis NDWI y NDVI 2009-2019. ....	6
Tabla N°2-2. Tamaño muestral usado en las extracciones de registros NDWI y NDVI, por estratos según nivel de recurrencia de cuerpos de agua obtenido desde imágenes de alta resolución durante los monitoreos 2016-2019. ....	8
Tabla N°3-1. Análisis exploratorio de datos, índices espectrales NDWI y NDVI, sector La Punta y La Brava. ....	13
Tabla N°3-2. Prueba Mann- Kendall de tendencias, índices NDWI/NDVI (previo al proyecto y con operación del proyecto). Sector La Punta y La Brava. ....	14
Tabla N°3-3. Prueba <i>Kruskal – Wallis</i> : NDVI vs. NDVI por estrato, y NDWI vs. NDWI por estrato, sector La Punta y La Brava. ....	16
Tabla N° 3-4. Correlación Pearson de índices NDWI vs NDVI por estrato. ....	17
Tabla N°3-5. Correlación Pearson de índices NDWI/NDVI vs superficies históricas y de seguimiento PMB. ....	17
Tabla N°3-6. Análisis exploratorio de datos, índices espectrales NDWI y NDVI, sector Peine. ....	25
Tabla N°3-7. Prueba Mann- Kendall de tendencias, índices NDWI/NDVI (previo al proyecto y con operación del proyecto). ....	26
Tabla N°3-8. Prueba <i>Kruskal – Wallis</i> : NDVI vs. NDVI por estrato, y NDWI vs. NDWI por estrato, sector Peine. ....	28
Tabla N° 3-9. Correlación Pearson de índices NDWI vs NDVI por estrato. ....	29
Tabla N°3-10. Correlación Pearson de índices NDWI/NDVI vs. superficies históricas y de seguimiento PMB. ....	29

## ANEXO II. INFORME DE ESTADO ECOLÓGICO DEL SISTEMA

### METODOLOGÍAS Y ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS DE TENDENCIAS DE SUPERFICIE CUBIERTA POR LAGUNAS - AÑO N°4 -

#### 1 INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde a la descripción de **metodologías y análisis de tendencias de superficie cubierta por lagunas del Año N°4 de monitoreo, para la evaluación de estado ecológico del sistema**. Dicho análisis se basa en lo definido en el Plan de Manejo Biótico<sup>1</sup>, según numeral 4.2.5 Frecuencia de Medición, Tabla 4.2.6 del Anexo 2 (Plan de Manejo Biótico de la Adenda 5 del proyecto).

La variable “superficie cubierta por lagunas” corresponde a uno de los 3 indicadores de estado para el análisis del estado ecológico, establecida en el PMB y quedó comprometida para los sistemas lagunares de los sectores La Punta y La Brava, y Sistema lagunar Peine.

En base a lo requerido por Albemarle, este Anexo presenta la información anexa o complementaria al Informe de Estado Ecológico del Sistema, que contiene el análisis multitemporal y de tendencias que se subdivide en cuatro tipos de evaluaciones:

- **Análisis de recurrencia**<sup>2</sup> de la superficie cubierta por lagunas, obtenida desde imágenes de alta resolución durante monitoreos de invierno (agosto) y verano (diciembre) entre el 2016 y 2019; con la finalidad de evaluar su comportamiento multitemporal en los cuerpos de agua.
- **Análisis de tendencias**<sup>3</sup> en los sistemas lagunares, para describir el patrón multitemporal para un periodo de 10 años entre 2009 y 2019 (en las cuatro temporadas del año), a través de imágenes Landsat (media resolución, píxel de 30m).

El propósito de analizar un periodo de estudio superior al de seguimiento del proyecto (cuatro años), es determinar si existen cambios en la tendencia histórica previo y posterior a la construcción y operación del proyecto (julio 2016).

Dado que la determinación de la superficie de lagunas se realiza con la implementación de un modelo de clasificación supervisada, en base a la metodología “Índice Normalizado de Diferencia de Agua” (NDWI por sus siglas en inglés), se utilizarán los índices espectrales

---

<sup>1</sup> Plan de Manejo Biótico, en adelante PMB, correspondientes a la RCA N°21/2016 que aprueba el Proyecto “**Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama, Región de Antofagasta – Rockwood Lithium**” (en adelante Albemarle o ALB), para el monitoreo de “Superficie Cubierta por Lagunas”.

<sup>2</sup> Análisis de recurrencia se refiere al número de superposiciones de una misma condición de análisis, es decir la presencia en seguimientos sucesivos, en este caso de la superficie cubierta por lagunas obtenida desde imágenes de alta resolución para los años de monitoreo 2016-2019.

<sup>3</sup> Análisis de tendencias, se refiere a evaluar la existencia de cambios direccionales del comportamiento de una variable en el tiempo (aumento o descenso), y poner en un contexto más amplio el seguimiento producto del Plan de Manejo Biótico, a modo de contextualizar a través de estos datos el estado actual del área de estudio.

que han mostrado mejor ajuste en el modelo, para dar continuidad a la metodología propuesta para ese estudio según el PMB<sup>4</sup>; así los índices usados son:

- **NDWI** (*Normalized Difference Water Index*), el cual varía entre -1 y 1, asociando los valores positivos para las superficies con agua o húmedas y cero o negativo para el suelo y la vegetación terrestre estresada.
  - El **NDVI** (*Normalized Difference Vegetation Index*), el cual en valores negativos de 0 a -1, detecta proporcionalmente suelos secos y/o desnudos, y presencia de cuerpos de agua; es decir valores cercanos a -1 reflejan mayor contenido de humedad típico de un suelo saturado a sobresaturado. Además este índice, en el rango positivo 0 a 1, diferencia la detección de vegetación.
- **Correlación de superficies lagunares con índices espectrales**, lo cual se realiza con el propósito de establecer si existe relación entre los estratos de recurrencia y los valores por índice espectral (NDWI y NDVI), lo cual permite especificar que la tendencia de estos valores, puede extrapolar variaciones en las superficies de los cuerpos de agua.
  - **Análisis de variación espacial**, a partir de la interpolación del coeficiente de variación de los índices espectrales de estudio en el periodo 2009-2019, para cuantificar la variabilidad espacial y así señalar dónde se presentan las mayores y menores variaciones en los parámetros espectrales dentro de los sectores de monitoreo.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2019

Se realizó un **análisis de recurrencia** de la superficie cubierta por lagunas, obtenida desde imágenes de alta resolución durante monitoreos de invierno (agosto) y verano (diciembre) entre el 2016 y 2019; con la finalidad de evaluar su comportamiento multitemporal; siendo la superficie, una de las variables de evaluación del estado, según lo establecido por el PMB.

Para la determinación de las áreas y sus niveles de recurrencia, se procedió a la delimitación por superposición de las superficies lagunares en formato *shape*. Estas son las resultantes del seguimiento de las coberturas de los cuerpos de agua a través del uso de imágenes satelitales de alta resolución (Pleiades - 1A), registradas semestralmente desde agosto 2016 a diciembre de 2019<sup>5</sup>.

Estas superficies lagunares según su recurrencia 2016- 2019 fueron clasificadas en estratos para caracterizar lo que corresponde a recubrimientos con presencia continua, parcial o nula de cuerpos de agua. Para la clasificación, se seleccionaron aquellas superficies poligonales de igual criterio, que coinciden en la superposición cuatro o más veces (siendo ocho el número mayor de repeticiones,

<sup>4</sup> Metodología descrita en la sección 4.6 del Informe anual N°4 de Área de Lagunas del Plan de Manejo Biótico (desarrollada desde el inicio de la etapa de monitoreo).

<sup>5</sup> Además de los polígonos resultantes del modelo de clasificación supervisada de los cuerpos de agua (Plan de Manejo Biótico, en adelante PMB, correspondientes a la RCA N°21/2016), se utilizaron los puntos de muestreo GPS GNSS que también entregan información de recurrencia de los cuerpos de agua, y que sostienen con datos en terreno el criterio de determinación de recurrencia por superposición de áreas.

equivalente al total de monitoreos). El resultado fueron tres estratos temáticos de recurrencia de los cuerpos de agua:

- (i) **Permanentes:** presencia de lámina de agua entre cinco (5) y ocho (8) de los seguimientos efectuados, equivalente a una recurrencia mayor al 50%.
- (ii) **No permanentes:** presencia de lámina agua entre uno (1) y cuatro (4) de los seguimientos efectuados, lo que equivale a recurrencia de 1/8 a 4/8, es decir de 13% a 50% (incluido).
- (iii) **Otros recubrimientos:** presencia nula de agua durante los 8 monitoreos, equivalente a una recurrencia de 0%.

## 2.2 Obtención de registros NDWI y NDVI de imágenes Landsat 2009-2019

Las evaluaciones del **análisis de tendencias y de variación espacial de los cuerpos de agua** para un periodo de 10 años (superior al de seguimiento del proyecto, cuatro años), se realizaron con los índices espectrales NDWI y NDVI, los cuales han mostrado mejor ajuste en el modelo de determinación de la superficie de lagunas, para dar continuidad a la metodología propuesta según el PMB.

Para la obtención de los registros de los índices NDWI y NDVI, se obtuvieron y procesaron imágenes Landsat de resolución media, de tres tipos de sensores: 5 (TM), 7 (ETM+), y 8 (OLI), a modo de completar la serie temporal superior a 10 años de estudio (2009 – 2019) y considerando una imagen por estación (marzo-abril, agosto, octubre, diciembre). La **Tabla N°2-1** presenta el detalle de los sensores usados en el análisis con NDWI y NDVI.

**Tabla N°2-1. Características de los sensores Landsat utilizados en el análisis NDWI y NDVI 2009-2019.**

Sensor	Características	Detalle bandas utilizadas	Fechas de análisis
LANDSAT 5, TM (Thematic Mapper)	<b>Bandas Sensor</b>	3 rojo: 0,630–0,690 $\mu\text{m}$ 4 NIR: 0,77–0,90 $\mu\text{m}$	2009 (abril, agosto, octubre, diciembre)
	<b>Resolución espacial</b>	Multiespectral: 30 mts	2010 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2011 (marzo, agosto)
LANDSAT 7, ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)	<b>Bandas Sensor</b>	3: Rojo: 0,630–0,692 $\mu\text{m}$ 4: NIR: 0,772–0,898 $\mu\text{m}$ 8: Pancromática: 0,515–0,896 $\mu\text{m}$	2011 (octubre, noviembre) 2012 <sup>6</sup> (agosto, octubre, diciembre)
	<b>Resolución espacial</b>	Pancromática: 15mts Multiespectral: 30 mts	2013 (octubre)
LANDSAT 8, OLI (Operational Land Imager)	<b>Bandas Sensor</b>	4: Rojo: 0,630–0,680 $\mu\text{m}$ 5: NIR: 0,845–0,885 $\mu\text{m}$ 8: Pancromática: 0,500–0,680 $\mu\text{m}$ 9: Cirrus: 1,360–1,390 $\mu\text{m}$	2013 (abril, agosto, diciembre) 2014 (marzo, agosto, octubre, diciembre)
	<b>Resolución espacial</b>	Pancromática: 15mts Multiespectral: 30 mts	2015 (abril, agosto, octubre, diciembre)

<sup>6</sup> Se excluye de la serie de tiempo las imágenes Landsat 7 de abril de 2012, por presentar problemas en los valores por banda espectral, lo que influía en los resultados del índice NDWI generando datos erróneos fuera del rango de este índice.

Sensor	Características	Detalle bandas utilizadas	Fechas de análisis
			2016 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2017 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2018 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2019 (marzo, septiembre, octubre, diciembre)

Elaboración propia

Las imágenes Landsat (5 (TM), 7 (ETM+), 8 (OLI)) fueron adquiridas a través de la plataforma *Earth Explorer* del Servicio Geológico de Estados Unidos – *United States Geological Survey USGS* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Estas imágenes fueron obtenidas considerando cuatro imágenes anuales correspondientes a una por estación, desde el año 2009 a 2019. Este conjunto de datos espaciales fue georreferenciado en Sistema de Referencia WGS84 (*World Geodetic System 1984*) y proyección cartográfica UTM zona 19S.

En la etapa de preprocesamiento, para cada imagen Landsat (y para cada una de sus bandas espectrales), se realizó la corrección radiométrica, la cual consiste en la conversión de los valores de píxeles desde números digitales (ND) a unidades de radiancia espectral absoluta [ $W / (m^2 *sr * \mu m)$ ]; en este proceso los valores desde ND se transformaron a valores de reflectancia *Top-Atmospheric* (TOA).

El proceso de corrección radiométrica se utiliza como medio de calibración para disminuir la falta de uniformidad en los valores digitales. Esta conversión proporciona una base para la comparación de datos en una sola escena o entre imágenes adquiridas en fechas diferentes o por diferentes sensores (Chander *et al.*, 2009).

Posteriormente, se realizó la corrección atmosférica de cada imagen. Esta corrección busca reducir el efecto de la interacción de las moléculas y partículas de la atmósfera (vapor de agua, polvo en suspensión, entre otras) en la radiación electromagnética captada por los sensores de un satélite.

En el caso particular de las imágenes del sensor Landsat 7, además se corrigió el bandeo proveniente de un fallo en el Corrector de Escaneo Lineal (SLC) del satélite. En cada imagen se usó una del mismo sensor y con posición del bandeo diferente (los archivos originales de la imagen traen la información que debe ser reconstituida) para realizar la interpolación de datos. En total, se utilizaron siete imágenes de este sensor y fueron usadas a modo de lograr completar la serie de tiempo estacional y multianual superior a 10 años de análisis.

Para todas las imágenes, la automatización del proceso de correcciones radiométrica y atmosférica; así como el relleno del bandeo en el caso de imágenes del sensor Landsat 7, se realizó mediante la plataforma de análisis “R”, que se encuentra bajo la Licencia Pública General (GPL) del proyecto colaborativo de software libre GNU. La secuencia de operaciones se ejecutó en un *script*, basados en los paquetes *RStoolbox*, *Landsat*, *Landsat8*, *Rgdal* (*gdal\_fillnodata*), *Rgeos*, y *Raster*, este *script* también considero la obtención de los índices espectrales utilizados (NDVI, NDWI), además de la proyección y corte de áreas de estudio.

Para optimizar los procesos de análisis de tendencias y de la variabilidad espacial, se definieron muestras para el proceso de extracción de valores de los índices NDWI y NDVI. En la determinación del tamaño de la muestra, se tuvo en cuenta los estratos de recurrencia de los cuerpos de agua (permanentes – no permanentes – otros recubrimientos; detalle en **sección 2.1**), y el grado de confianza con se requería evaluar. El tamaño de muestra total se calculó a partir de la ecuación (Chuvieco, 2002):

$$n = (z^2 s^2)/(L^2 + (s^2 z^2)/N)$$

Donde: L: intervalo de error tolerable (0,05 (5%));  $s^2$  varianza muestral<sup>7</sup>; z: rango de probabilidad (para nivel de confianza 95%,  $z = 1,96$ ); N: tamaño de la población<sup>8</sup>.

A partir de este cálculo se generó una malla de puntos aleatorios utilizando una herramienta de generación automática de ArcGIS, en base a la ubicación espacial según estratos de recurrencia de los cuerpos de agua y el número estimado para cada uno de ellos. La **Tabla N°2-2** muestra el tamaño de la muestra para cada sector; se utiliza el mismo número de puntos tanto en la extracción de valores de NDWI como de NDVI<sup>9</sup>.

**Tabla N°2-2. Tamaño muestral usado en las extracciones de registros NDWI y NDVI, por estratos según nivel de recurrencia de cuerpos de agua obtenido desde imágenes de alta resolución durante los monitoreos 2016-2019.**

Sector	Estratos de muestreo según nivel de recurrencia de cuerpos de agua	Tamaño muestral (n)*
La Punta y La Brava	<b>Permanente:</b> recurrencia >50%	105
	<b>No Permanente:</b> recurrencia del 13% a 50%	113
	<b>Otros Recubrimientos:</b> recurrencia 0%	129
	<i>Total</i>	347
Peine	<b>Permanente:</b> recurrencia >50%	67
	<b>No Permanente:</b> recurrencia del 13% a 50%	65
	<b>Otros Recubrimientos:</b> recurrencia 0%	82
	<i>Total</i>	214

\* Corresponde al número de píxeles de imágenes Landsat de los cuales se extrajeron los valores de NDWI y NDVI por estrato y sector de monitoreo, para evaluación de análisis de tendencias y variabilidad espacial de los cuerpos de agua 2009-2019.

Elaboración propia

### 2.3 Análisis de tendencias 2009-2019

Este tipo de análisis permite identificar patrones temporales con una secuencia mayor a la de seguimiento del proyecto (4 años a la fecha) y tiene la ventaja de detectar procesos en desarrollo con una periodicidad estacional e interanual. De esta forma, a partir del análisis de tendencias se

<sup>7</sup> La varianza muestral (para cada índice) se conocerá previo a la extracción de datos, por ende, se realiza una estimación a priori obteniendo un estimado de la desviación estándar de acuerdo a la "regla práctica del intervalo", utilizando la ecuación:  $s \approx \frac{\text{rango}}{4}$ , donde el rango = valor máximo – valor mínimo. El rango de valores corresponde el determinado para cada índice en la presencia de agua.

<sup>8</sup> En este caso el tamaño de la población corresponde a las superficies por estratos y su proporción en píxeles.

<sup>9</sup> Para ambos índices, se verificó el mismo rango de valores y en base a la misma superficie, se determina el mismo tamaño de muestra.



puede obtener la identificación temprana de procesos que puedan afectar a los sistemas lagunares, o bien contextualizar los procesos de variación dentro de un ciclo más amplio.

Para ello, se realizó un análisis exploratorio de los datos con diagramas de caja (*boxplot*)<sup>10</sup> de la totalidad de los datos de los índices espectrales NDWI y NDVI según estrato de recurrencia. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA<sup>11</sup>) con el programa estadístico MINITAB<sup>®</sup>, para establecer las diferencias/ similitud (estadísticamente significativas) de los registros de los índices NDWI y NDVI entre los estratos de recurrencia de los cuerpos de agua. Es decir, evaluar la representatividad del valor de los índices en cada uno de los estratos de análisis.

Para el análisis ANOVA se realizó la prueba de Kruskal-Wallis (no paramétrica, Kruskal & Wallis, 1952) por índice y por estrato temático. La prueba supone que las varianzas de los grupos son iguales y que los residuos o errores son aleatorios, independientes e idénticamente distribuidos siguiendo una ley normal con media 0 y desviación constante. El valor del parámetro F de esta prueba, se acompaña del valor-p para cuantificar estadísticamente la importancia de la variación. El valor-p se comparó con su nivel de significancia. Los niveles de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) usados fueron 0,05 y 0,1. Un  $\alpha$  de 0,05 indica que el riesgo de concluir que existe variación significativa.

Además, se evaluó la tendencia a escala anual del periodo 2009 – 2019 (anual previo y con operación del proyecto) mediante la prueba no paramétrica Mann – Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1962). Esta prueba proporciona el parámetro S el cual es un indicador de una tendencia ascendente, y un valor negativo muy bajo indica una tendencia a la baja. El valor de este parámetro, se acompaña de la probabilidad asociada y el tamaño de la muestra, n, para cuantificar estadísticamente la importancia de la tendencia. Un valor de significancia, *p-value*, inferior a 0,05 – 0,1 garantiza que la hipótesis adoptada tiene altas garantías de veracidad; a medida que este valor se hace más grande, las probabilidades van disminuyendo; hasta que, llegando a un valor de 1, la probabilidad es nula (Muñoz Marín, 2008).

Los cálculos de tendencia se realizaron con el software R, empleándose para su cálculo las librerías *Kendall* y *Stats*.

## 2.4 Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI

Se utilizó el coeficiente de Pearson (paramétrico) para examinar la fuerza y la dirección de la relación lineal de las superficies de los cuerpos de agua (determinadas desde imágenes de alta resolución, durante monitoreos 2016-2019) con el NDWI y el NDVI obtenidos desde imágenes Landsat. Esto con la finalidad de preestablecer la confiabilidad de la extrapolación en la evaluación de tendencias.

El valor del coeficiente de correlación puede variar de  $-1$  a  $+1$ . Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

<sup>10</sup> Diagramas de caja- *boxplot*: Es un método estandarizado para representar gráficamente una serie de datos numéricos a través de sus cuartiles. De esta manera, el diagrama de caja muestra la mediana y los cuartiles de los datos, pudiendo también representar los valores atípicos.

<sup>11</sup> ANOVA por su sigla en inglés, *Analysis of Variance*.

El signo del coeficiente indica la dirección de la relación. Si ambas variables tienden a aumentar o disminuir a la vez, el coeficiente es positivo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia arriba. Si una variable tiende a incrementarse mientras la otra disminuye, el coeficiente es negativo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia abajo.

Para determinar si la correlación entre las variables es significativa, se comparó el valor-p con su nivel de significancia. Los niveles de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) usados fueron 0,05 y 0,1. Un  $\alpha$  de 0,05 indica que el riesgo de concluir que existe una correlación, cuando en realidad no es así, es 5%. El valor-p indica si el coeficiente de correlación es significativamente diferente de 0 (un coeficiente de 0 indica que no existe una relación lineal).

## 2.5 Análisis de variación espacial 2009-2019

Se generó una interpolación espacial (imagen ráster) estimada a partir del conjunto de puntos dispersos del coeficiente de variación<sup>12</sup> de los índices NDWI y NDVI 2009-2019, respectivamente (detalles de obtención de registros en **sección 2.2**). La interpolación se obtuvo mediante el método *Kriging* (comportamiento espacial), el cual responde a la noción de dependencia espacial en la cual las muestras cercanas tienen mayor similitud entre sí que las dispuestas apartadamente. Con esta información el método estima las variables en los puntos no muestrales basándose en estas muestras conocidas (Niño, 2008). Para ello se debe llevar un proceso de análisis estadístico de semivariogramas, seguido por la creación de la imagen ráster de las superficies continuas de la variable de análisis (coeficiente de variación del NDWI y NDVI, respectivamente).

Las imágenes *ráster* del coeficiente de variación del NDWI y NDVI, fueron clasificadas según los rangos de variación, siguiendo el método de rupturas naturales de Jenks (Jenks y Caspall, 1971). Las clases de cortes naturales se basan en las agrupaciones naturales inherentes a los datos. Los cortes de clase se caracterizan porque agrupan mejor los valores similares y maximizan las diferencias entre clases. Las entidades se dividen en clases cuyos límites quedan establecidos dónde hay diferencias considerables entre los valores de los datos.

En este caso fueron cinco rangos o quiebres naturales seleccionados, y que fueron reclasificados en un rango cualitativo, de acuerdo con el valor interpolado del coeficiente de variación<sup>13</sup>, los rangos son: (a) Muy alto, (b) Alto, (c) Medio, (d) Bajo<sup>14</sup>.

<sup>12</sup> El coeficiente de variación (CV) es una medida aplicada, que relaciona la desviación estándar y la media aritmética de un conjunto de datos definiendo la dispersión relativa de la muestra en estudio. Esta medida es la unidad interpolada en el método *Kriging* y fue calculada por la fórmula  $CV = \sigma/\mu$ , donde  $\sigma$ : desviación estándar (por punto de muestreo) y  $\mu$ : media aritmética de los valores por estrato temático. Los valores fueron normalizados.

<sup>13</sup> Coeficiente de variación: se utiliza cuando se desea hacer referencia a la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de un parámetro. A mayor valor del coeficiente de variación, mayor heterogeneidad de los valores.

<sup>14</sup> Los valores que se consideran sin variación y no se expresaron gráficamente.

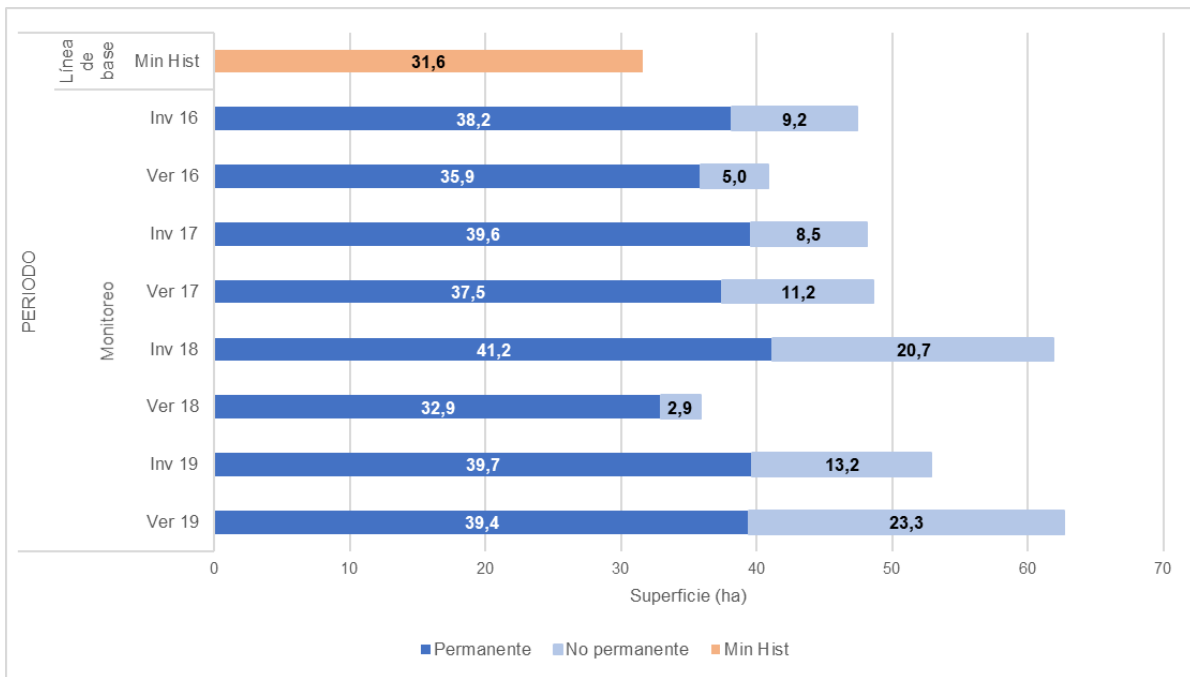
### 3 RESULTADOS y DISCUSIÓN

#### 3.1 La Punta y La Brava

##### 3.1.1 Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2019

A partir del análisis de recurrencia, la **Figura N°3-1**, muestra la relación entre las superficies reportadas producto del seguimiento del PMB, y los estratos temáticos; además de la relación de las lagunas permanentes con la superficie histórica.

**Figura N°3-1. Superficies permanentes y no permanentes, sector La Punta y La Brava.**

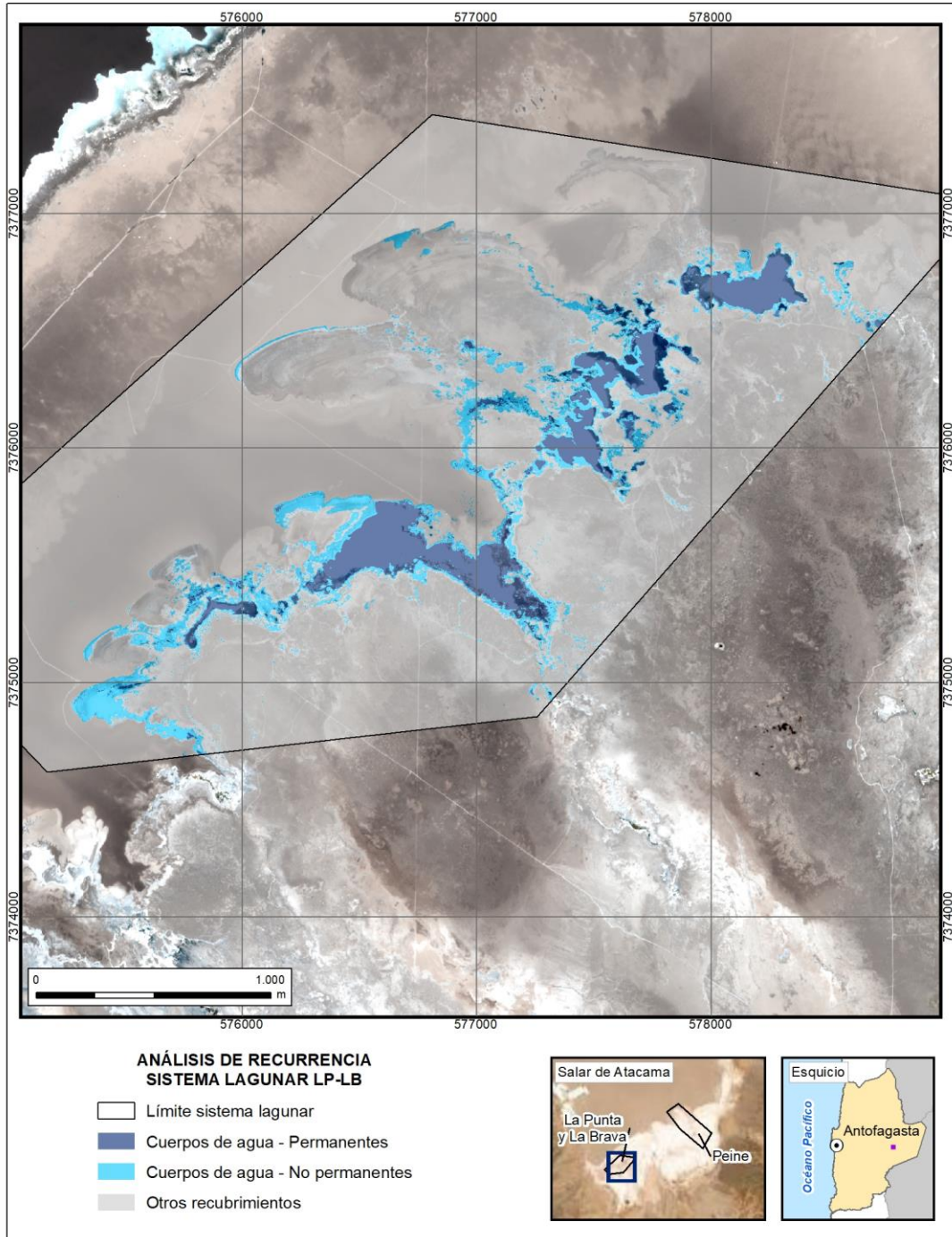


Fuente: Elaboración Propia

Semestralmente, los valores reportados de las superficies lagunares corresponden a la suma de los estratos *permanente* y *no permanente* de cada temporada. Así, el mínimo histórico para este sector (31,6 ha), calculado en febrero de 2014, se mantiene bajo el promedio de los valores totales calculados durante el monitoreo 2016 - 2019, equivalente a 49,8 ha, con una diferencia mínima de +4,3 ha (verano de 2018) y una diferencia máxima de +31,1 ha (verano de 2018). Las mayores variaciones se presentan en las superficies de lagunas *no permanentes*, presentando un rango de superficies de 20,3 ha. La variación de las superficies lagunares *permanentes* es menor, presentando un rango de 8,3 ha (**Figura N°3-1**).

La **Figura N°3-2** muestra los estratos clasificados en recurrencia para los sectores de La Punta y La Brava.

Figura N°3-2. Estratos según clasificación de recurrencia, Sector La Punta y La Brava.



Elaboración propia

**3.1.2 Análisis de tendencias 2009 - 2019**

La **Tabla N°3-1** muestra el análisis exploratorio de los datos de los índices NDWI y NDVI, del periodo 2009 - 2019. El promedio del índice NDWI para los cuerpos de agua *permanente*, se encuentran alrededor de 0,116, un valor mínimo de -0,278 y máximo de 0,918; mientras que para los valores de NDVI se encuentran entorno a los -0,152, con valores mínimos de -0,908 y máximos 0,187.

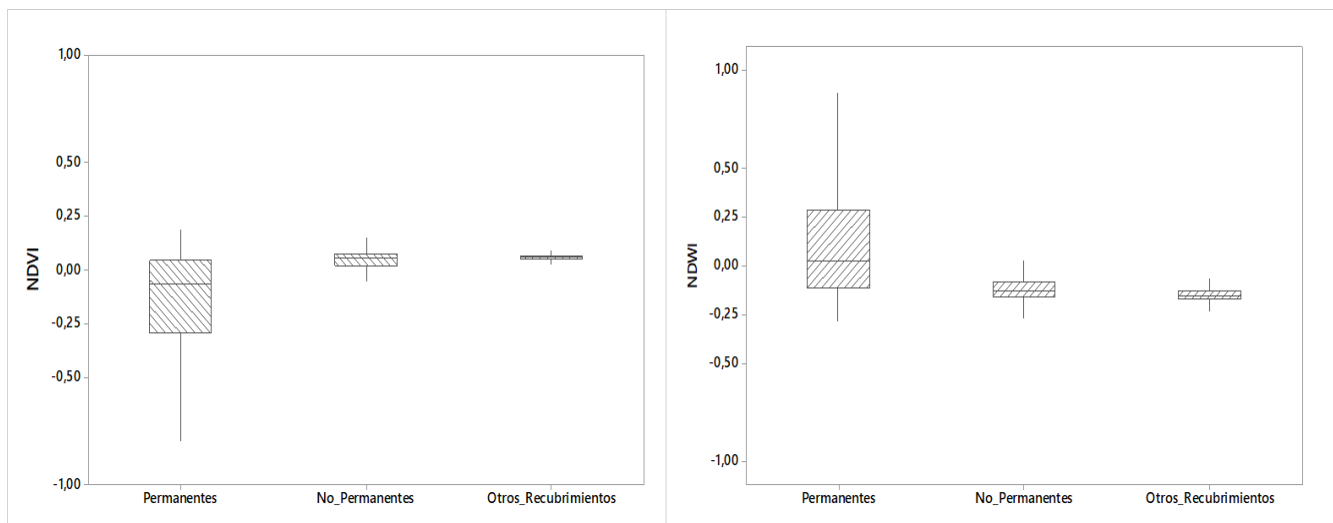
**Tabla N°3-1. Análisis exploratorio de datos, índices espectrales NDWI y NDVI, sector La Punta y La Brava.**

Parámetro	Recubrimiento	Media	Mínimo	Mediana	Máximo
NDWI	E1 – C.A. Permanente	0,116	-0,278	0,024	0,918
	E2 – C.A. No Permanente	-0,099	-0,424	-0,127	0,733
	E3 – Otros Recubrimientos	-0,150	-0,330	-0,154	0,057
NDVI	E1 – C.A. Permanente	-0,152	-0,908	-0,065	0,187
	E2 – C.A. No Permanente	0,032	-0,716	0,054	0,306
	E3 – Otros Recubrimientos	0,058	-0,129	0,060	0,205

Elaboración propia

En general, los valores de NDWI y NDVI de los cuerpos de agua *permanentes* presentan gran variabilidad, según se ve en la **Figura N°3-3**, con datos asimétricos (tendientes a valores (-) en NDVI y (+) en NDWI). Sin embargo, los valores de los estratos *no permanentes* y *otros recubrimientos* presentan poca variabilidad, con mayor cantidad de valores atípicos en la serie de tiempo, y con un comportamiento similar entre ambos estratos.

**Figura N°3-3. Diagrama de caja de NDWI y NDVI, por tipos de estratos (permanente – no permanente – otros recubrimientos), en el sector La Punta y La Brava.**



Elaboración propia

La serie temporal de los valores de imágenes NDWI y NDVI se evaluó mediante la prueba Mann – Kendall para obtener la tendencia de ambos índices en el periodo 2009 -2019 (en dos conjuntos; previo al proyecto y rango completo con operación de proyecto). La **Tabla N°3-2** muestra los resultados de la prueba para el sector La Punta y La Brava.

**Tabla N°3-2. Prueba Mann- Kendall de tendencias, índices NDWI/NDVI (previo al proyecto y con operación del proyecto). Sector La Punta y La Brava.**

Parámetro	Recubrimiento	z	p- value	S	tau
NDWI (2009/ abr 2016)	E1 – C.A. Permanente	-0,810	0,418	-42	-0,111
	E2 – C. A. No Permanente	-4,208	*0,000	↓-214	-0,566
	E3 - Otros Recubrimientos	-4,959	*0,000	↓-252	-0,667
NDWI (2009/ 2019)	E1 – C.A. Permanente	-2,302	**0,021	-221	-0,245
	E2 – C.A. No Permanente	-4,982	*0,000	↓-477	-0,528
	E3 - Otros Recubrimientos	-5,149	*0,000	↓-493	-0,546
Parámetro	Recubrimiento	z	p-value	S	tau
NDVI (2009/ abr 2016)	E1 – C.A. Permanente	-0,619	0,536	-34	-0,084
	E2 – C.A. No Permanente	2,532	**0,011	↑136	0,335
	E3 - Otros Recubrimientos	3,733	*0,000	↑200	0,493
NDVI (2009/ 2019)	E1 – C.A. Permanente	0,131	0,895	14	0,015
	E2 – C.A. No Permanente	2,114	**0,035	↑210	0,222
	E3 - Otros Recubrimientos	2,397	**0,017	↑238	0,252

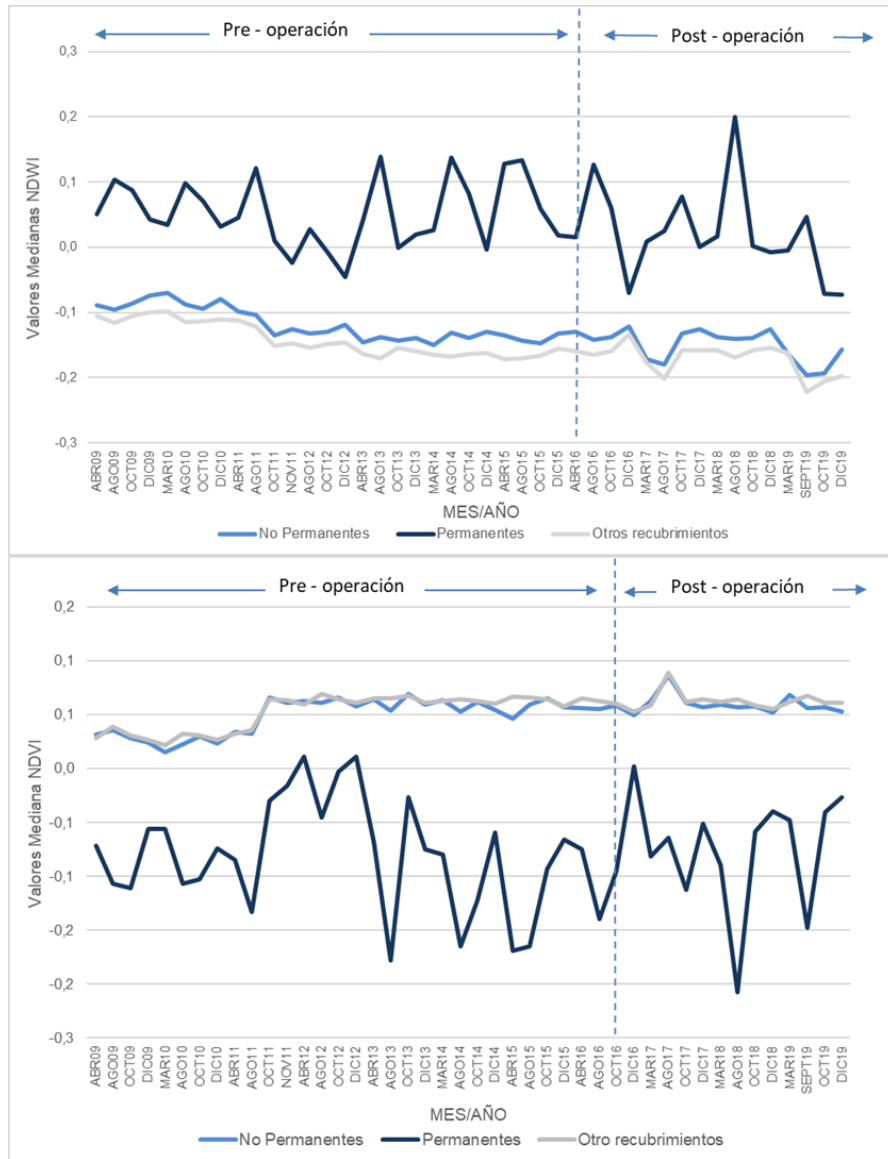
Donde: **Rango previo al proyecto:** 2009/ abr 2016; **Rango completo con operación del proyecto:** 2009/2019; \*: estadísticamente significativo; ↑: alza en tendencia; ↓: baja en tendencia. Elaboración propia

El análisis de las tendencias de NDWI y NDVI previo y posterior al inicio de operación del proyecto, muestra una baja en la tendencia de los valores de NDWI (aumento de valores negativos del índice) en el estrato *otros recubrimientos* y *no permanentes*. Por otro lado, se evidencia una tendencia al alza de los valores de NDVI (aumento de valores positivos del índice) en los estratos *otros recubrimientos* y *no permanentes*, previo y posterior al proyecto. En el primer caso, la variación temporal del índice NDWI a la baja, en el caso del estrato *otros recubrimientos*, puede explicarse por suelos desnudos o vegetación escasa más definida en sus valores de reflectancia, y baja en la tasa de humedad; situación sostenida previo y posterior al inicio de operación del proyecto; en el caso de los valores *no permanentes* el aumento en los valores del índice NDWI podría estar definido por la disminución de estos ecotonos de humedad dando paso a suelo desnudo. Para el segundo caso, el aumento de valores positivos de NDVI, acentúan la presencia de suelos desnudos y vegetación escasa (como los que compone el estrato de *otros recubrimientos*); y describen un aumento parcial de áreas con menor humedad contenida, como se evidencia con los resultados del estrato *no permanente*.

Las variaciones del estrato *permanente* no se consideran estadísticamente significativas, aunque gráficamente se puede establecer una leve tendencia a la baja de los valores de NDVI y NDWI, lo que no expresa una variación de las superficies de este estrato. La **Figura N°3-4** muestra las tendencias de las medianas de los valores de NDWI y NDVI en la serie de tiempo 2009 – 2019. En ella es posible apreciar que las tendencias descritas por la prueba Mann – Kendall tienen una correspondencia gráfica, en donde se verifican que los valores de NDWI de los estratos *no*

permanentes y otros recubrimientos tienen una leve tendencia a la baja, y los valores de NDVI de los estratos permanentes una leve tendencia al alza.

**Figura N°3-4. Tendencias de medianas de los índices NDWI y NDVI, en serie de tiempo 2009/2019.**



Elaboración propia

Asumiendo estas tendencias por estratos, se establecerá mediante la prueba de *Kruskal – Wallis*, si son grupos con medianas distintas, y por lo tanto, si existen diferencias estadísticamente significativas entre cada estrato. Esto permitirá establecer la existencia de grupos diferentes, por lo tanto, áreas bien definidas por el conjunto de datos que la describe, y con tendencias por índices particulares. La **Tabla N°3-3** muestra los resultados de la prueba y señala que cada estrato es definido por grupo de valores característico. En general, el estrato *permanente* es el que difiere más

del rango promedio de todas las observaciones, estando sobre la media general, lo que lo posiciona por el valor de los datos como el más disímil.

**Tabla N°3-3. Prueba *Kruskal – Wallis*: NDVI vs. NDVI por estrato, y NDWI vs. NDWI por estrato, sector La Punta y La Brava.**

<i>Estadísticos descriptivos</i>				
NDVI / Estrato	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
E1 – C.A. Permanente	44	-0,074	22,500	-9,345
E2 – C.A. No Permanente	44	0,057	82,864	3,476
E3 – Otros Recubrimientos	44	0,062	94,136	5,870
General	132		65,500	

<i>Estadísticos descriptivos</i>				
NDWI / Estrato	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
E1 – C.A. Permanente	43	0,032	107,930	9,223
E2 – C.A. No Permanente	43	-0,133	53,581	-2,453
E3 – Otros Recubrimientos	43	-0,158	33,488	-6,770
General	129		65,000	

Prueba: Ho: Hipótesis nula: todas las medianas son iguales

H1: Hipótesis alterna: al menos una mediana es diferente ( $p < 0,05$ )

NDWI - Método	GL	Valor H	Valor-p
No ajustado para empates	2	91,27	0,000
Ajustado para empates	2	91,27	0,000
NDVI - Método	GL	Valor H	Valor-p
No ajustado para empates	2	89,25	0,000
Ajustado para empates	2	89,25	0,000

Elaboración propia

La Prueba de correlación de *Pearson*, determinó que existe correspondencia entre los índices espectrales (NDWI y NDVI) por estrato temático. Así, el coeficiente de correlación entre NDVI/NDWI del estrato *no permanente* es  $-0,828$  y presenta una relación negativa entre variables (por ejemplo, a medida que el NDVI aumenta hay una disminución en los valores de NDWI). El valor de *p* es menor que el nivel de significancia lo que indica una correlación significativa. Para el estrato *permanente* el valor del coeficiente es de  $-0,915$  con relación negativa y correlación significativa; finalmente para el estrato *otros recubrimientos* el valor de coeficiente es  $-0,866$  con una relación negativa y correlación significativa (**Tabla N° 3-4**).

La resultante de los estadísticos señalados, señala una correlación entre los índices espectrales NDVI/NDWI con diferencias estadísticamente significativas por estrato, con variaciones medibles mediante el análisis temporal (**Tabla N° 3-4**).



**Tabla N° 3-4. Correlación Pearson de índices NDWI vs NDVI por estrato.**

Valores correlación NDVI vs NDWI (No Permanente)	
<i>Pearson</i>	-0,828
<i>Valor-p</i>	0,000
Valores correlación NDVI vs NDWI (Permanente)	
<i>Pearson</i>	-0,915
<i>Valor-p</i>	0,000
Valores correlación NDVI vs NDWI (Otros Recubrimientos)	
<i>Pearson</i>	-0,866
<i>Valor-p</i>	0,000

Elaboración propia

### 3.1.3 Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI

Para especificar si existe relación entre las tendencias de los índices espectrales NDVI/NDWI en los estratos *permanente* y *no permanentes*, y las superficies de los cuerpos de agua resultantes de datos históricos y del seguimiento del PMB, se realizó la prueba de correlación de *Pearson*. La **Tabla N°3-5** muestra una correlación débil entre factores, el resultado muestra un valor-p mayor al nivel de significancia (0,05 óptimo) en NDVI y NDWI. Sin embargo, existe una significancia débil entre los valores de NDVI y las superficies descritas para el sector; con esto es posible establecer confiabilidad en la extrapolación de datos desde la evaluación de datos conocidos basado en el estudio por estrato y no en conjunto donde existe mayor certidumbre de significancia estadística.

**Tabla N°3-5. Correlación Pearson de índices NDWI/NDVI vs superficies históricas y de seguimiento PMB.**

Valores correlación superficies vs. NDWI (Permanente + No Permanente)	
<i>Pearson</i>	0,124
<i>Valor-p</i>	0,71
Valores correlación superficies vs. NDVI (Permanente + No Permanente)	
<i>Pearson</i>	-0,423
<i>Valor-p</i>	0,10

Elaboración propia

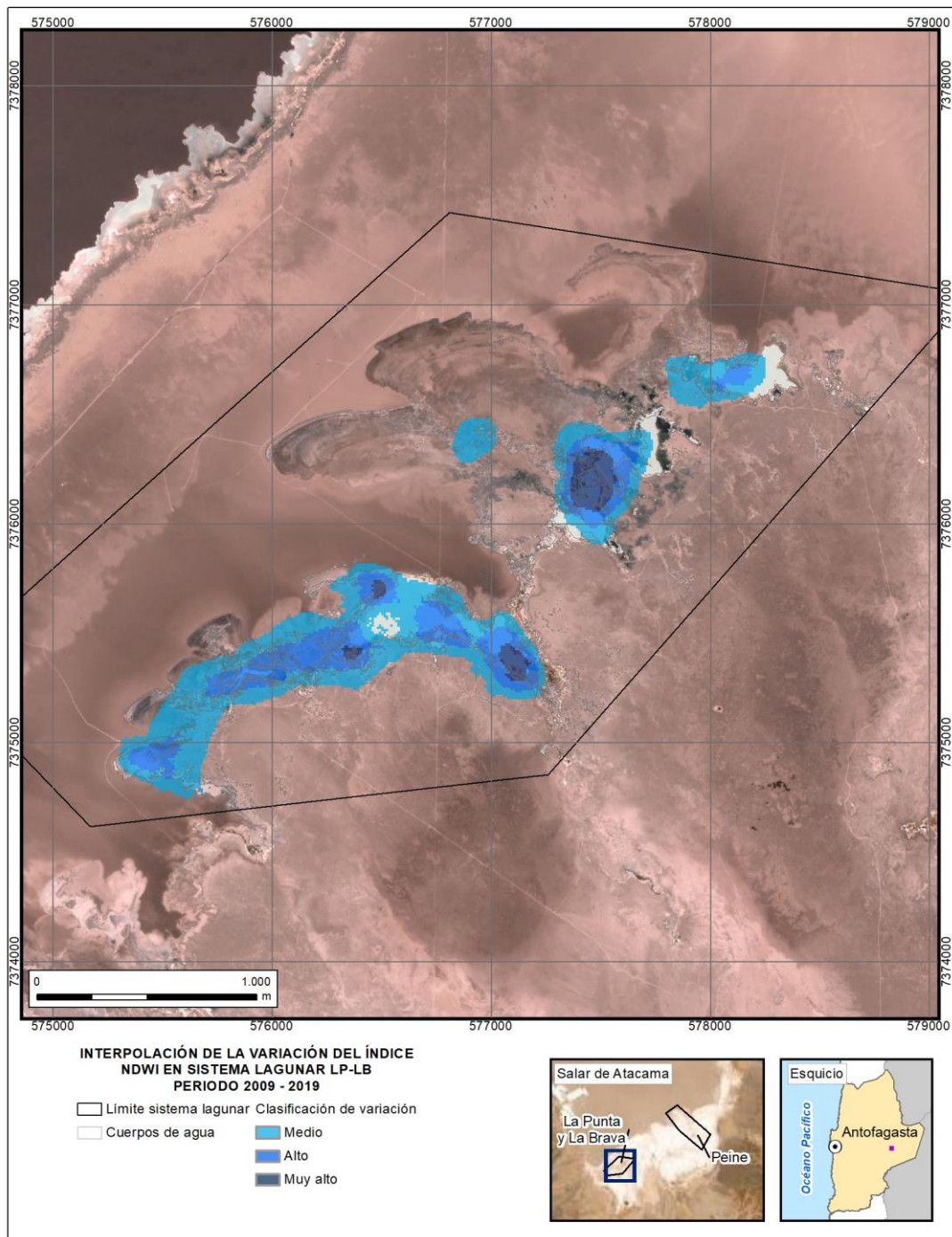
### 3.1.4 Análisis de variación espacial 2009 - 2019

La imagen raster generada a partir del conjunto de valores de coeficiente de variación de los índices NDWI y NDVI muestra la interpolación mediante el método *Kriging*. Estas áreas son aquellas en que la interpolación del coeficiente de correlación determina como zonas de alta variabilidad del índice, y donde la gestión puede asociar a zonas de análisis. Los resultados se muestran, para cada índice, en la **Figura N°3-5** y **Figura N°3-6**. Para el mejor entendimiento gráfico, se expresan aquellos valores muy alto, alto y medio.

Los resultados del método *Kriging*, en ambos índices, señala la existencia de zonas de muy alta, alta y media variación asociadas al estrato *no permanente*. En el caso de este estrato la variabilidad de

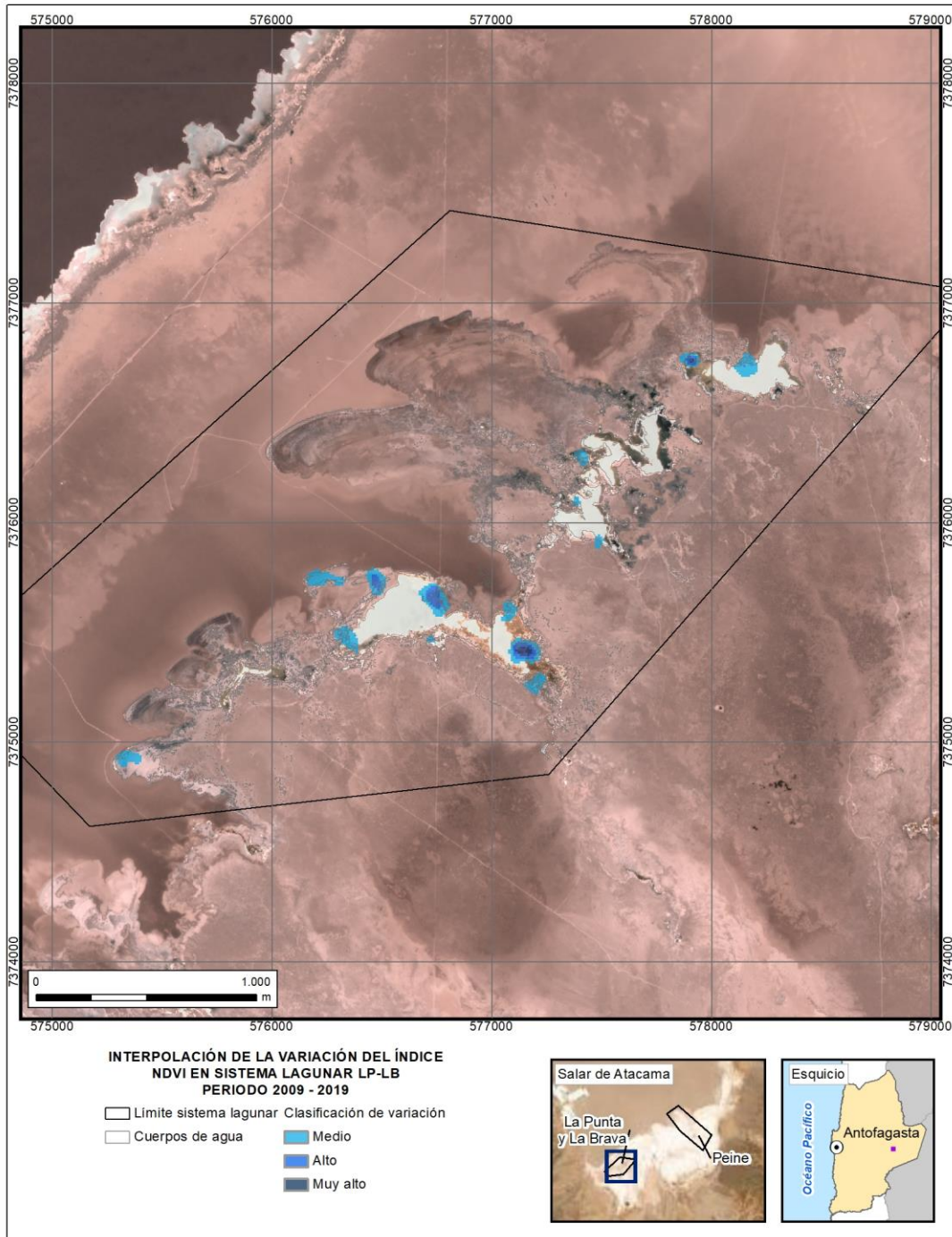
sus valores, lo da la propia naturaleza del estrato, que asume periodos de aumento/baja de humedad contenida, movimientos de aguas someras, y aumento/disminución del vigor en la escasa vegetación ribereña. Finalmente, la baja o nula variabilidad corresponde al estrato *otros recubrimientos*, el más estable en valores de índices, ya que describe suelos desnudos cubiertos de sal y de menor humedad superficial contenida.

**Figura N°3-5. Interpolación de la variación de NDWI, sector la Punta y La Brava.**



Elaboración propia

Figura N°3-6. Interpolación de la variación de NDVI, sector la Punta y La Brava.

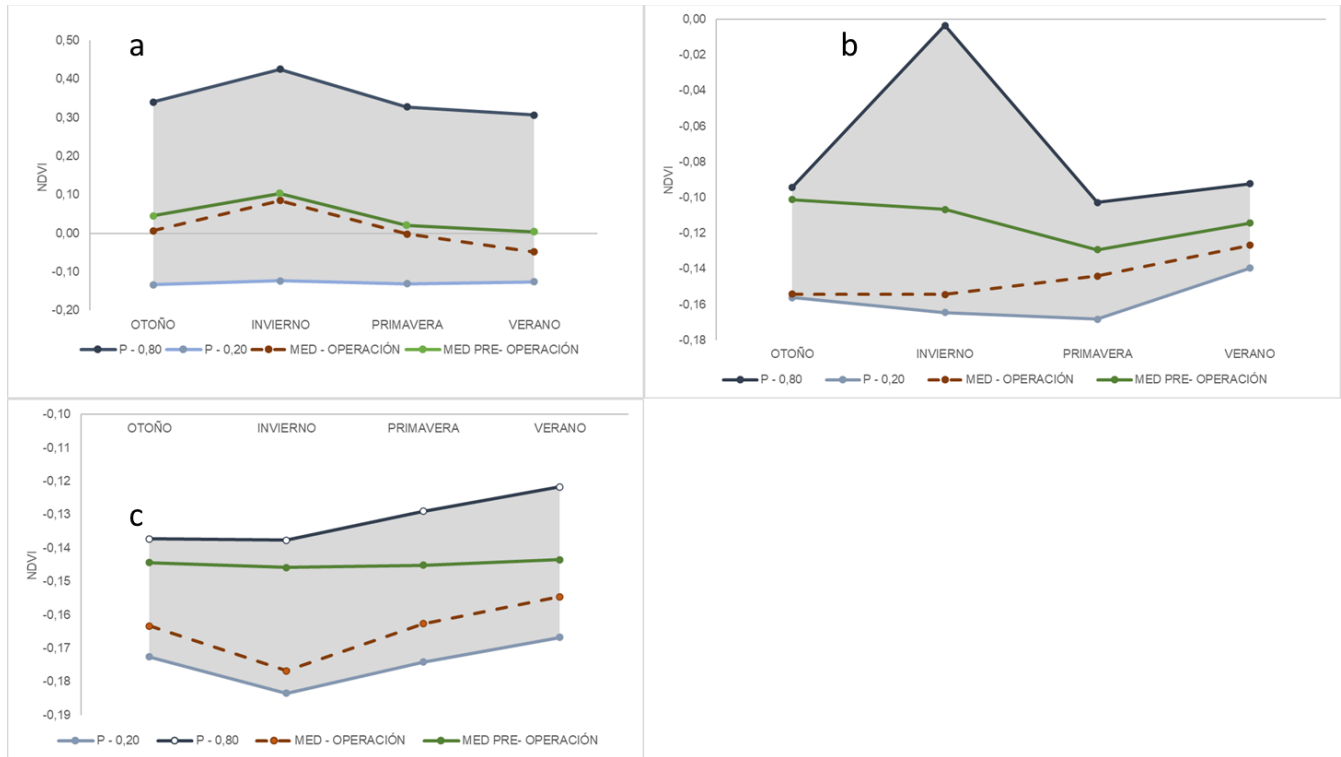


Elaboración propia

Finalmente, el análisis de los valores de NDVI y NDWI, y dado que es posible relacionarlos con las superficies de los cuerpos de agua por estrato del sector La Punta y La Brava; nos permite verificar si los valores de las superficies producto de datos históricos y los resultantes del seguimiento del PMB, se encuentran dentro de los rangos de variación del índice entre 2009 – 2019; y por lo tanto sus variaciones previas y posteriores al proyecto se encuentran dentro de los rangos esperables para la zona. La **Figura N°3-7** y **Figura N°3-8** muestran respectivamente la variación mensual de los valores de NDWI y NDVI y los valores (ha) de las superficies de los cuerpos de área.

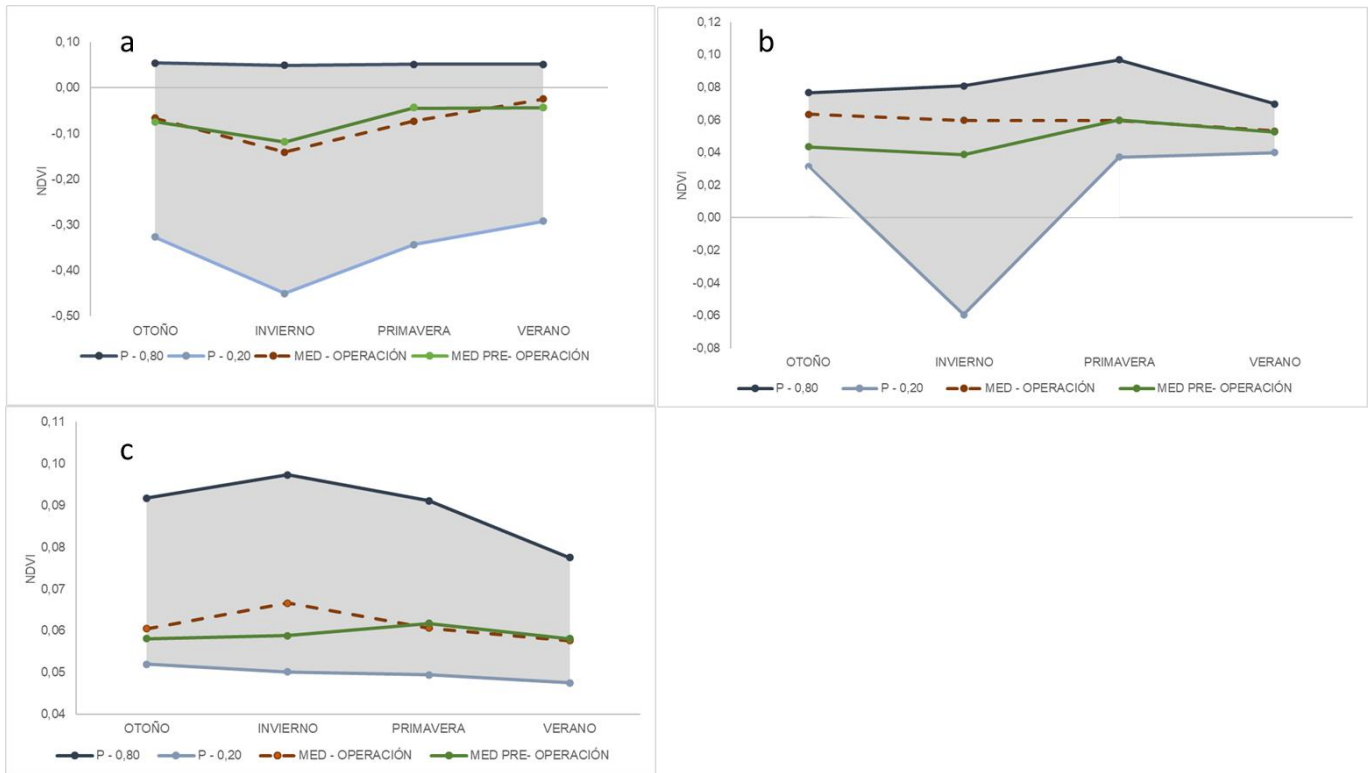
El análisis por estrato muestra que todos los casos las superficies de los cuerpos de agua del sector La Punta y la Brava, se encuentran dentro del rango histórico de valores de NDWI y NDVI, y puede explicar que las variaciones se encuentran dentro de lo esperable para el rango temporal.

**Figura N°3-7. Variación del índice NDWI vs. superficies, previo y posterior al proyecto.**



Donde (a) Permanentes (b) No permanentes (c) Otros Recubrimientos. Elaboración propia

**Figura N°3-8. Variación del índice NDVI vs. superficies, previo y posterior al proyecto.**



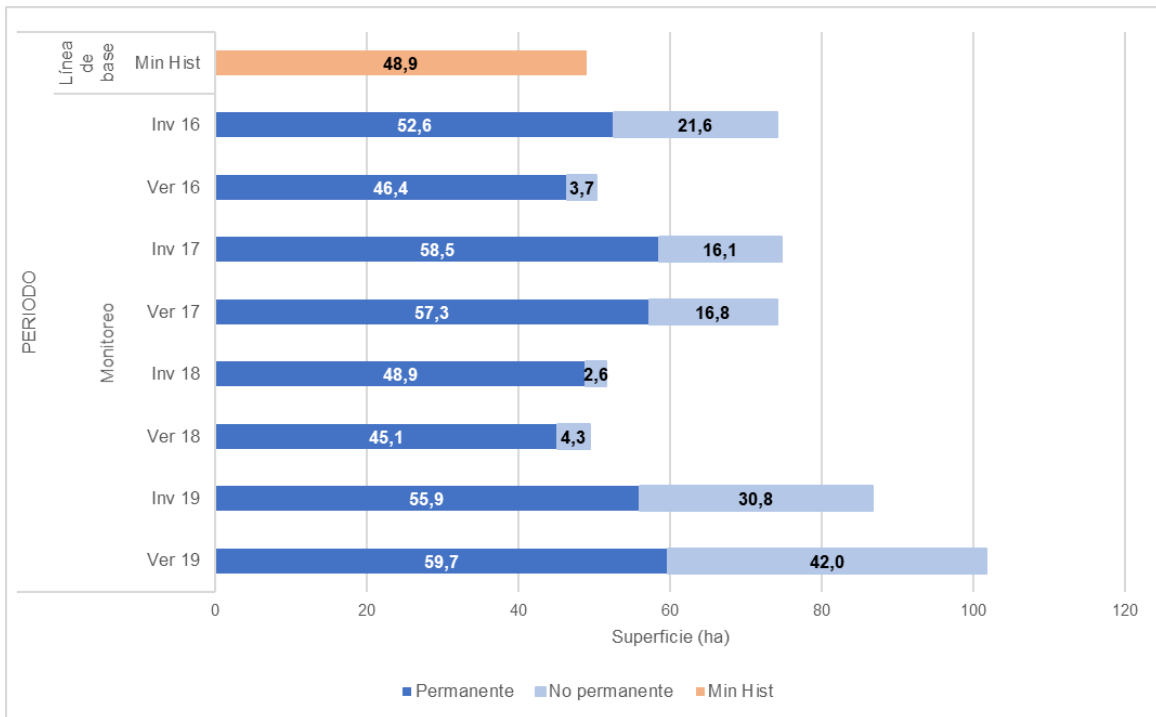
Donde (a) Otros Recubrimientos (b) No permanentes (c) Permanentes. Elaboración propia

### 3.2 Peine

#### 3.2.1 Análisis de recurrencia de la superficie lagunar 2016-2019

Del análisis de recurrencia, la **Figura N°3-9**, muestra la relación entre las superficies mínimas históricas y las reportadas producto del seguimiento del PMB, y los estratos temáticos *permanentes* y *no permanentes*.

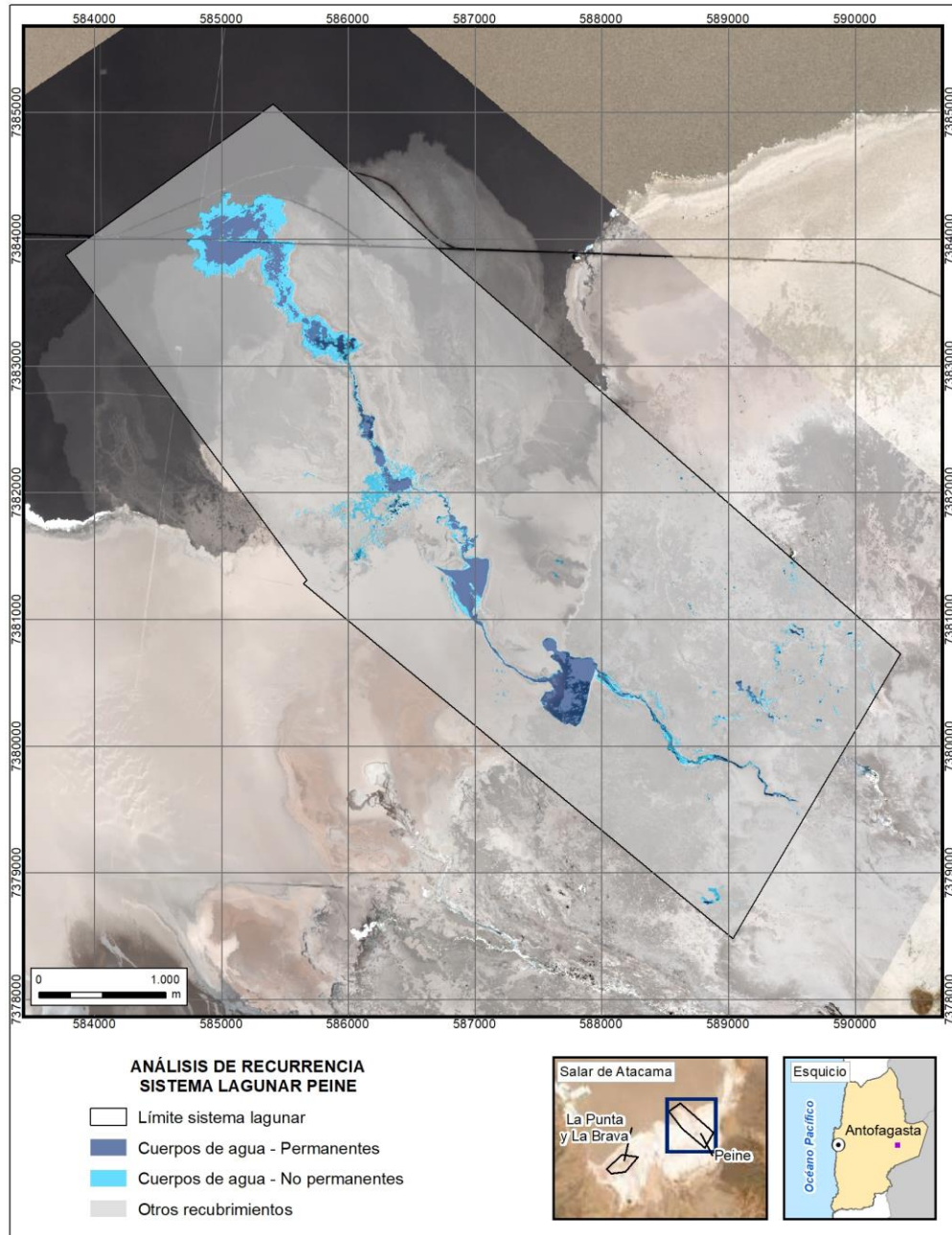
**Figura N°3-9. Superficies permanentes y no permanentes, sector Peine.**



Fuente: Elaboración Propia

Los valores de superficies cubiertas por lagunas reportados corresponden a la suma de los estratos *permanente* y *no permanente* calculados para este sector en cada temporada. Así, el mínimo histórico para este sector (48,9 ha), calculado en marzo de 2006, en general se mantiene bajo el promedio de los valores *permanentes* totales calculados durante el monitoreo, equivalente a 53,0 ha, con una diferencia de -3,8 ha (verano de 2018) y una diferencia máxima de +10,8 ha (verano de 2019). Las mayores variaciones se presentan en las superficies de lagunas *no permanentes*, presentando un rango de oscilación en superficies de 39,3 ha. La variación de las superficies lagunares *permanentes* es menor, presentando un rango de oscilación de 14,6 ha (**Figura N°3-2**). La **Figura N°3-10** muestra los estratos clasificados en recurrencia para el sector Peine.

**Figura N°3-10. Estratos según clasificación de recurrencia, sector Peine.**



Elaboración propia



**3.2.2 Análisis de tendencias 2009 - 2019**

La **Tabla N°3-6** muestra el análisis exploratorio de los datos de los índices NDWI y NDVI, del periodo 2009 – 2019 para el sector Peine. El promedio del índice NDVI para los cuerpos de agua *permanente*, se encuentran alrededor de -0,164, un valor mínimo de -0,840 y máximo de 0,120; mientras que para los valores de NDWI se encuentran entorno a los 0,094, con valores mínimos de -0,220 y máximos 0,870.

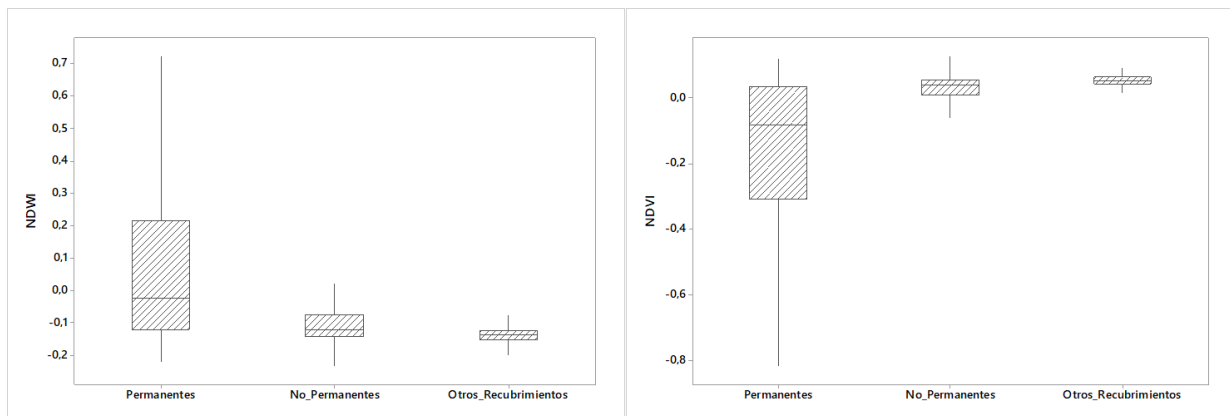
**Tabla N°3-6. Análisis exploratorio de datos, índices espectrales NDWI y NDVI, sector Peine.**

Parámetro	Recubrimiento	Media	Mínimo	Mediana	Máximo
NDWI	E1 – C.A. Permanente	0,094	-0,220	-0,020	0,870
	E2 – C.A. No Permanente	-0,059	-0,249	-0,121	0,817
	E3 – Otros Recubrimientos	-0,137	-0,253	-0,136	-0,068
NDVI	E1 – C.A. Permanente	-0,164	-0,840	-0,082	0,120
	E2 – C.A. No Permanente	-0,017	-0,818	0,041	0,148
	E3 – Otros Recubrimientos	0,052	-0,485	0,055	0,153

Elaboración propia

Los valores de NDWI y NDVI de los cuerpos de agua *permanentes* muestra variabilidad en sus datos, según se ve en la **Figura N°3-11**, con datos asimétricos (tendientes a valores (-) en NDVI y (+) en NDWI), sin presencia de valores atípicos. Sin embargo, los valores de los estratos *no permanentes* y *otros recubrimientos* presentan menor variabilidad, con mayor cantidad de valores atípicos en el caso del estrato *permanente* y en menor cuantía en el estrato *otros recubrimientos*, presentando además un comportamiento similar entre ambos.

**Figura N°3-11. Diagrama de caja de NDWI y NDVI, por tipos de estratos (permanente – no permanente – otros recubrimientos), en el sector Peine.**



Elaboración propia

La serie temporal de los valores de imágenes NDWI y NDVI se evaluó mediante la prueba Mann – Kendall para obtener la tendencia de ambos índices en cada una de las cuatro temporadas del año, en el periodo 2009 -2019 (en dos conjuntos: previo al proyecto y rango completo con operación de proyecto). La **Tabla N°3-7** muestra los resultados de la prueba para el sector Peine.

**Tabla N°3-7. Prueba Mann- Kendall de tendencias, índices NDWI/NDVI (previo al proyecto y con operación del proyecto).**

Parámetro	Recubrimiento	z	p- value	S	tau
NDWI (2009/ abr 2016)	E1 – C.A. Permanente	3,6154	*0,0003	↑184,0	0,4868
	E2 – C. A. No Permanente	-3,2203	*0,0013	↓-164,0	-0,4339
	E3 - Otros Recubrimientos	-3,5759	*0,0003	↓-182,0	-0,4815
NDWI (2009/ 2019)	E1 – C.A. Permanente	4,3745	*0,00001	↑149,0	0,4640
	E2 – C.A. No Permanente	-2,3443	*0,0191	↓-255,0	-0,2492
	E3 - Otros Recubrimientos	-3,4745	*0,0005	↓-333,0	-0,3688
Parámetro	Recubrimiento	z	p-value	S	tau
NDVI (2009/ abr 2016)	E1 – C.A. Permanente	-3,5078	*0,0004	↓-188,0	-0,4631
	E2 – C.A. No Permanente	2,0071	0,0447	↑108,0	0,2660
	E3 - Otros Recubrimientos	1,6695	0,0950	↑90,0	0,2217
NDVI (2009/ 2019)	E1 – C.A. Permanente	-4,5413	*0,0000	↓-450,0	-0,4757
	E2 – C.A. No Permanente	0,1517	0,8794	↑16,0	0,0169
	E3 - Otros Recubrimientos	1,2441	0,2135	↑124,0	0,1311

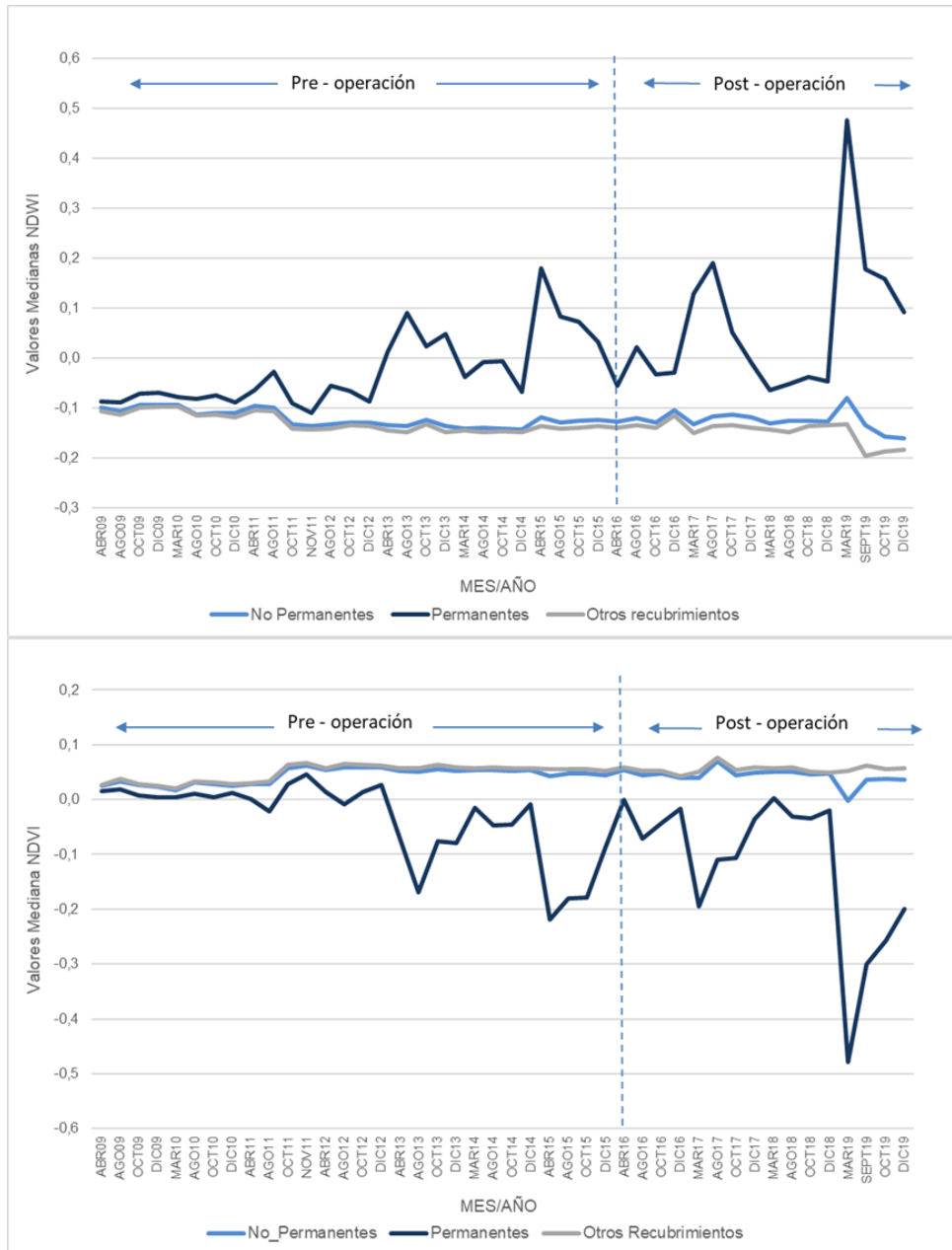
Donde: **Rango previo al proyecto:** 2009/ abr 2016; **Rango completo con operación del proyecto:** 2009/2019; \*: estadísticamente significativo; ↑: alza en tendencia; ↓: baja en tendencia. Elaboración propia

El análisis de las tendencias de NDWI y NDVI previo y posterior al proyecto, muestra en ambos casos un leve aumento en la tendencia de los valores de NDWI en el estrato *permanente*, y una muy leve disminución en la tendencia de los valores en los estratos *no permanentes* y *otros recubrimientos*. Por otro lado, se evidencia una tendencia a la baja en los valores de NDVI en el estrato *permanente*, y un muy leve aumento en los valores de los estratos *no permanentes* y *otros recubrimientos*.

En el primer caso, la variación temporal del índice NDWI, que presenta un aumento en sus valores (aumento de valores positivos) en su estrato *permanente*, puede relacionarse con la estabilización de las áreas de ocupación de este estrato, cuyas características están más asociadas a lagunas y sus corredores, que a cuerpos de agua con reflectancia superficial; por otro lado, los cuerpos de agua *no permanentes* presentan una leve variabilidad en su evolución, lo que señala una disminución de ecotonos húmedos (zonas de alta humedad o rebalse de lagunar), lo que también se sustenta con el leve aumento de valores de NDWI del estrato *otros recubrimientos* lo que señala su permanencia como zonas de suelos desnudos de baja humedad superficial.

El análisis de los datos de NDVI para los estratos señalados, muestra las mismas tendencias descritas por NDWI para los estratos *permanentes*, *no permanentes* y *otros recubrimientos*. En la **Figura N°3-12** se puede apreciar las tendencias de las medianas de los valores de NDWI y NDVI en la serie de tiempo 2009 - 2019, en ella es posible evaluar las tendencias descritas por la prueba Mann – Kendall y verificar la correspondencia gráfica a los resultados de la prueba.

**Figura N°3-12. Tendencias de medianas de los índices NDVI (arriba) y NDWI (abajo), en serie de tiempo 2009/2019, sector Peine.**



Elaboración propia

Asumiendo estas tendencias por estratos, se establecerá mediante la prueba de *Kruskal – Wallis* si son grupos con medianas distintas, y por lo tanto si existen diferencias estadísticamente significativas entre cada estrato. Esto permitirá establecer la existencia de grupos diferentes, por lo tanto, áreas bien definidas por el conjunto de datos que la describe, y con tendencias por índices particulares. La **Tabla N°3-8** muestra los resultados de la prueba y señala que cada estrato es definido por grupo de valores característico. El estrato *otros recubrimientos* es el que difiere más del rango promedio de

todas las observaciones, estando sobre la media general, lo que lo posiciona por el valor de los datos como el más disímil.

**Tabla N°3-8. Prueba *Kruskal – Wallis*: NDVI vs. NDVI por estrato, y NDWI vs. NDWI por estrato, sector Peine.**

<i>Estadísticos descriptivos</i>				
NDVI / Estrato	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
E1 – C.A. Permanente	44	-0,0268557	24,0	-9,04
E2 – C.A. No Permanente	44	0,0469342	79,0	2,65
E3 – Otros Recubrimientos	44	0,0558723	96,5	6,38
General	132		66,5	

<i>Estadísticos descriptivos</i>				
NDWI / Estrato	N	Mediana	Clasificación de medias	Valor Z
E1 – C.A. Permanente	43	-0,032628	107,5	9,12
E2 – C.A. No Permanente	43	-0,126731	53,1	-2,56
E3 – Otros Recubrimientos	43	-0,136573	34,5	-6,56
General	129		65,0	

Prueba: Ho: Hipótesis nula: todas las medianas son iguales  
 H1: Hipótesis alterna: al menos una mediana es diferente ( $p < 0,05$ )

NDWI - Método	GL	Valor H	Valor-p
No ajustado para empates	2	88,55	0,000
Ajustado para empates	2	88,55	0,000
NDVI - Método	GL	Valor H	Valor-p
No ajustado para empates	2	86,29	0,000
Ajustado para empates	2	86,29	0,000

Elaboración propia

La Prueba de correlación de Pearson, determinó que existe correspondencia entre los índices espectrales (NDWI y NDVI) por estrato temático. Así, el coeficiente de correlación entre NDVI/NDWI del estrato *no permanente* es  $-0,685$  y presenta una relación negativa entre variables (por ejemplo, a medida que el NDVI aumenta hay una disminución en los valores de NDWI). El valor de  $p$  es menor que el nivel de significancia lo que indica una correlación significativa. Para el estrato *permanente* el valor del coeficiente es de  $-0,961$  con relación negativa y correlación significativa; finalmente para el estrato *otros recubrimientos* el valor de coeficiente es  $-0,733$  con una relación negativa y correlación significativa (**Tabla N° 3-9**).

La resultante de los estadísticos señalados, señala una correlación entre los índices espectrales NDVI/NDWI con diferencias estadísticamente significativas por estrato, con variaciones medibles mediante el análisis temporal (**Tabla N° 3-9**).

**Tabla N° 3-9. Correlación Pearson de índices NDWI vs NDVI por estrato.**

Valores correlación NDVI vs NDWI (No Permanente)	
<i>Pearson</i>	-0,685
<i>Valor-p</i>	0,000
Valores correlación NDVI vs NDWI (Permanente)	
<i>Pearson</i>	-0,961
<i>Valor-p</i>	0,000
Valores correlación NDVI vs NDWI (Otros Recubrimientos)	
<i>Pearson</i>	-0,733
<i>Valor-p</i>	0,000

Elaboración propia

### 3.2.3 Correlación de superficies lagunares con registros de NDVI y NDWI

Para especificar si existe relación entre las tendencias de los índices espectrales NDVI/NDWI en los estratos *permanente* y *no permanentes*, y las superficies de los cuerpos de agua resultantes de datos históricos y del seguimiento del PMB, se realizó la prueba de correlación de *Pearson*. La **Tabla N°3-10** muestra la correlación entre estos datos, el resultado muestra un valor-p menor al nivel de significancia en NDVI, que indica que la correlación es significativa; no así con el valor-p de NDWI que indica una correlación débil. El índice NDVI muestra una correlación negativa. Sin embargo, con ambos índices es posible establecer confiabilidad en la extrapolación de datos desde la evaluación de datos conocidos.

**Tabla N°3-10. Correlación Pearson de índices NDWI/NDVI vs. superficies históricas y de seguimiento PMB.**

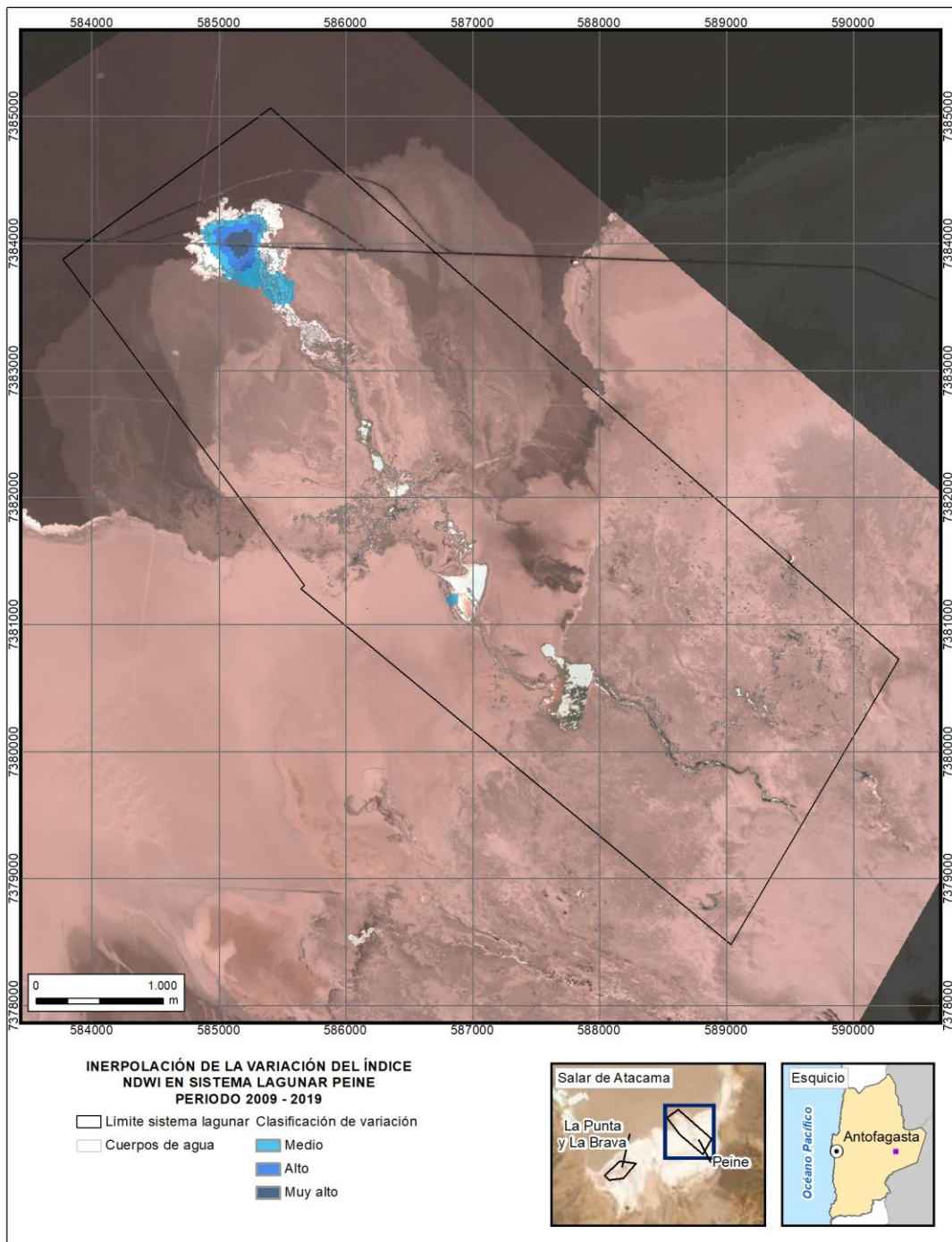
Valores correlación superficies vs. NDWI (Permanente + No Permanente)	
<i>Pearson</i>	0,550
<i>Valor-p</i>	0,08
Valores correlación superficies vs. NDVI (Permanente + No Permanente)	
<i>Pearson</i>	-0,724
<i>Valor-p</i>	0,01

Elaboración propia

### 3.2.4 Análisis de variación espacial 2009 - 2019

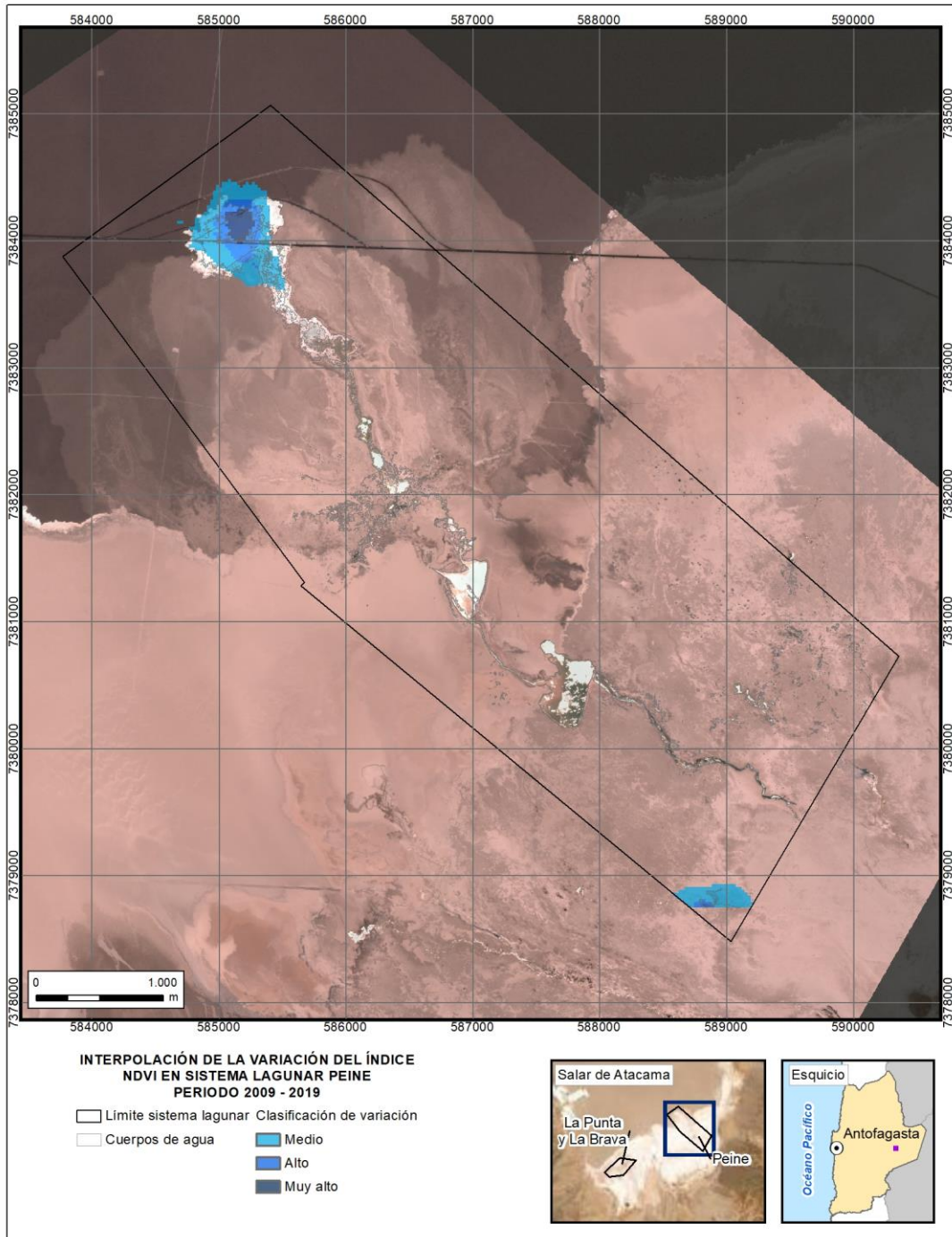
Los resultados del método *Kriging*, en ambos índices, en general señalan que la mayor variabilidad de valores se encuentra en el área de Laguna Interna, es allí donde se verifican valores muy alto, alto y medio en los estratos *permanente* y *no permanente*. En el caso del estrato *permanente*, esta variación podría ser una medida de profundidad y/o aumento de sedimentación o turbiedad de las aguas. En el caso de los estratos *no permanente* la variabilidad se produce por la muy alta variación a un área de inundación cíclica de gran superficie. Finalmente, la baja o nula variabilidad corresponde al estrato más estable en valores de índices, ya que describe suelos desnudos cubiertos de sal estables. Los resultados en la **Figura N°3-13** y **Figura N°3-14**.

**Figura N°3-13. Interpolación de la variación de NDWI, sector Peine.**



Elaboración propia

**Figura N°3-14. Interpolación de la variación de NDVI, Peine.**

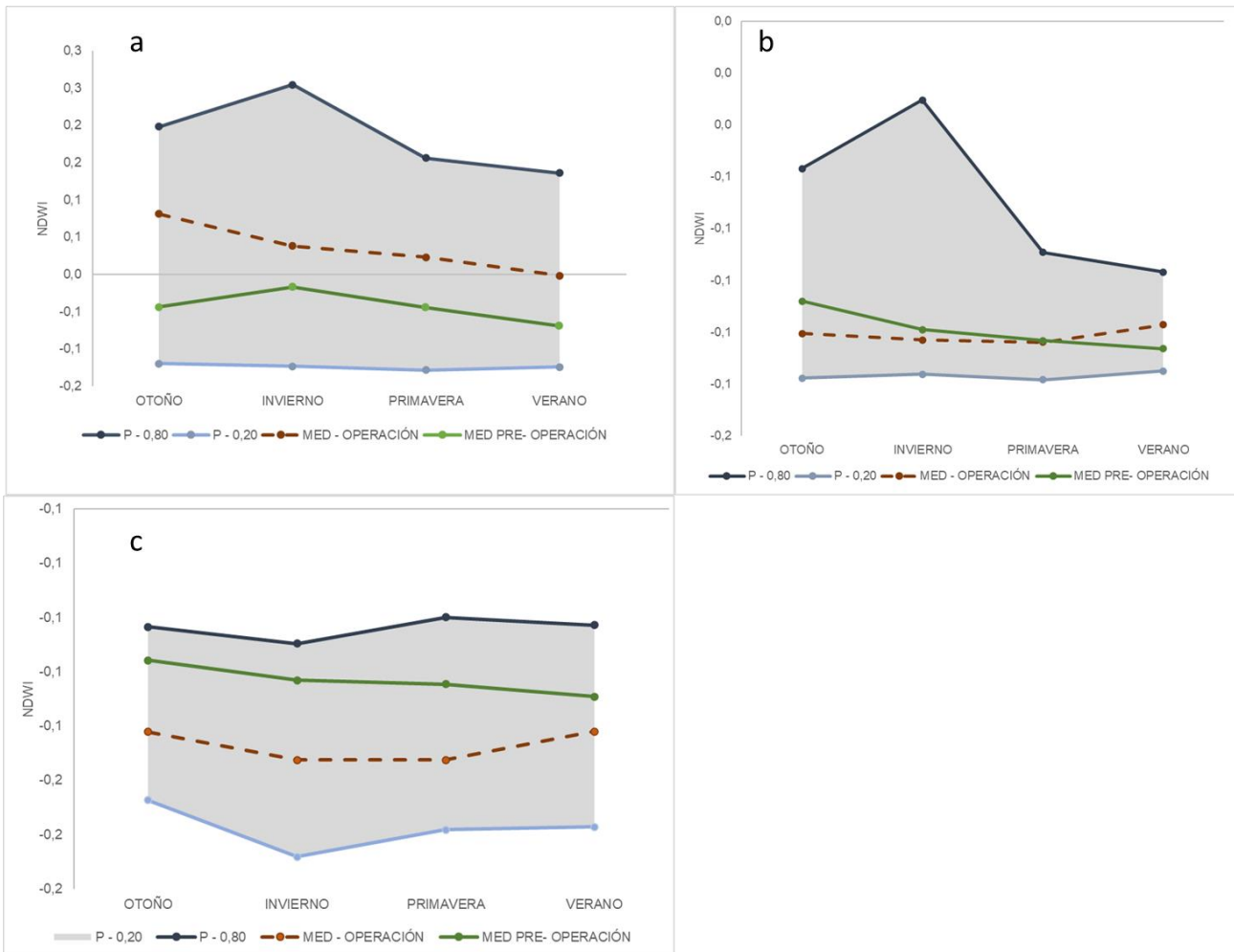


Elaboración propia

Del análisis de los valores de NDWI y NDVI, y dado que es posible relacionarlos con las superficies de los cuerpos de agua del sector Peine; nos permite verificar si los valores de las superficies producto de datos históricos y los resultantes del seguimiento del PMB, se encuentran dentro de los rangos de variación del índice entre 2009 – 2019; y por lo tanto sus variaciones previas y posteriores al proyecto se encuentran dentro de los rangos esperables para la zona. La **Figura N°3-15 y Figura N°3-16** muestra la variación mensual de los valores de NDVI/NDWI y los valores (ha) de las superficies de los cuerpos de área.

El análisis por estrato muestra que en todos los casos las superficies de los cuerpos de agua del sector Peine, se encuentran dentro del rango histórico de valores de NDWI y NDVI, y puede explicar que las variaciones se encuentran dentro de lo esperable para el rango temporal.

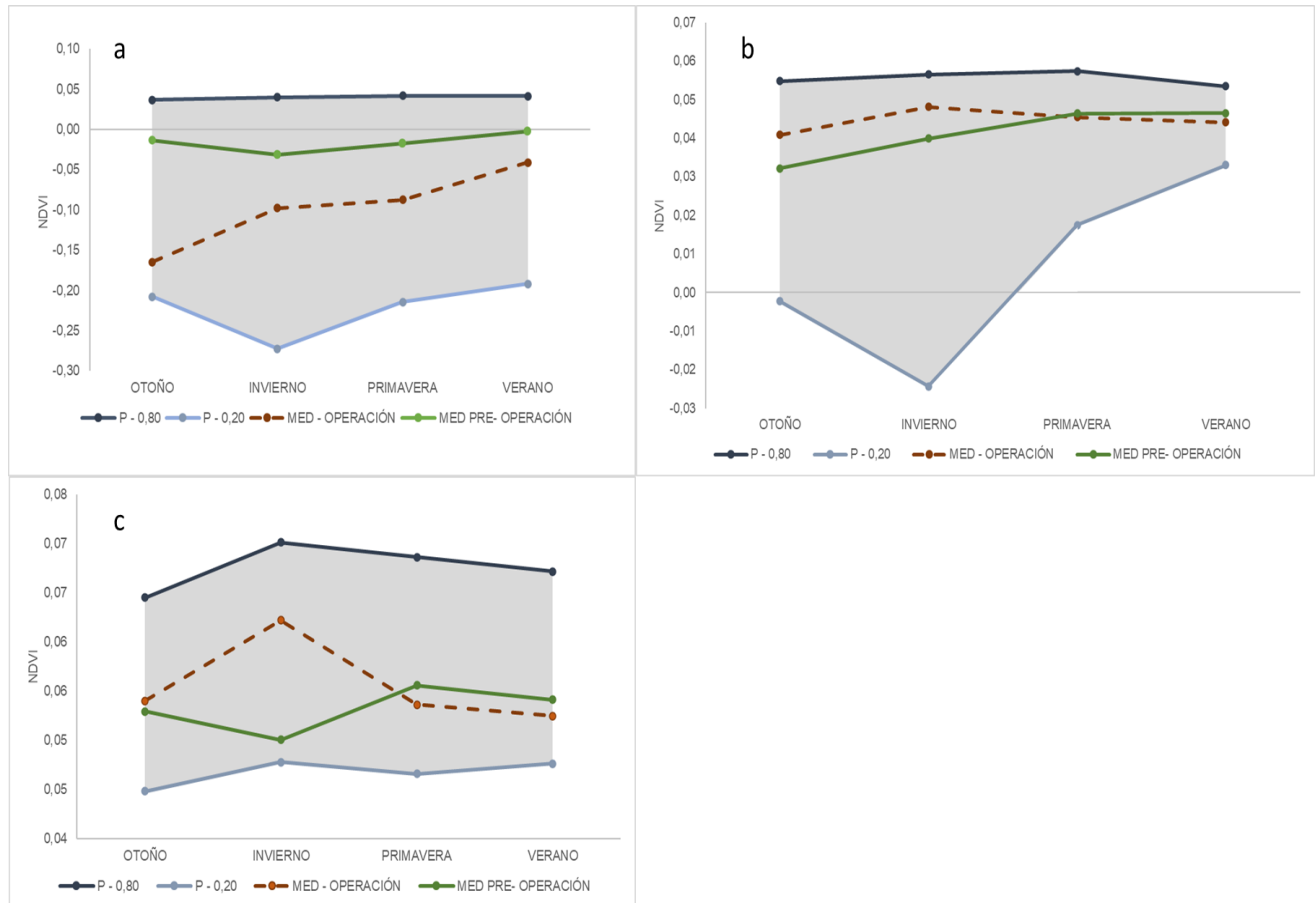
**Figura N°3-15. Variación del índice NDWI y Superficies pre y post proyecto.**



Donde (a) Permanentes (b) No permanentes (c) Otros Recubrimientos. Elaboración propia



**Figura N°3-16. Variación del índice NDVI vs. superficies pre y post - proyecto.**



Donde (a) Permanentes (b) No permanentes (c) Otros Recubrimientos. Elaboración propia.

## 4 CONCLUSIONES

**De acuerdo al análisis de recurrencia** realizado, se puede señalar que, el comportamiento multitemporal de los cuerpos de agua durante el monitoreo en el sector de La Punta y La Brava se presenta como un incremento de las superficies *no permanentes* en invierno en comparación con las mismas en verano. En el sector de Peine, si bien se observa un comportamiento similar, la variación de las superficies *no permanentes* muestra una fuerte influencia en base a la dinámica de laguna Interna, cuyo comportamiento es diferente al resto del sistema, lo que determina también la diferencia del estrato *no permanente* entre el invierno y el verano. Se destaca que en ambos sectores las superficies *permanentes* sumadas a las *no permanentes* calculadas durante la etapa de monitoreo están por sobre el mínimo histórico.

**De acuerdo al análisis con los índices espectrales NDWI y NDVI**, realizado para un periodo pre operación (2009 – 2016) y post inicio de operación del proyecto (2009 – 2019), se indica que en ambos sectores los valores de NDWI y NDVI de los cuerpos de agua *permanentes* presentan una alta variación, con datos asimétricos (de valores positivos en NDWI y negativos en NDVI), mientras que los valores de los estratos *no permanentes* y *otros recubrimientos* presentan una baja variabilidad, con mayor cantidad de valores atípicos en la serie de tiempo, y con un comportamiento similar entre ambos estratos.

El análisis de las tendencias en el sector La Punta y La Brava de índices NDWI y NDVI previo y posterior al inicio de operación proyecto, muestra una baja en la tendencia de los valores de NDWI (aumento de valores negativos del índice) en el estrato *otros recubrimientos* y *no permanentes*. Por otro lado, se evidencia una tendencia al alza de los valores de NDVI (aumento de valores positivos del índice) en los estratos *otros recubrimientos* y *no permanentes*, previo y posterior al proyecto. En el primer caso, la variación temporal del índice NDWI a la baja, en el caso del estrato *otros recubrimientos*, puede explicarse por suelos desnudos o vegetación escasa más definida en sus valores de reflectancia, y baja en la tasa de humedad; situación sostenida previo y posterior al proyecto; en el caso de los valores *no permanentes* el aumento en los valores del índice NDWI podría estar definido por la disminución de estos ecotonos de humedad dando paso a suelo desnudo. Para el segundo caso, el aumento de valores positivos de NDVI, acentúan la presencia de suelos desnudos y vegetación escasa (como los que compone el estrato de *otros recubrimientos*); y describen un aumento parcial de áreas con menor humedad contenida, como se evidencia con los resultados del estrato *no permanente*.

El análisis de las tendencias del sector Peine de índices NDWI y NDVI previo y posterior al proyecto, muestra en ambos casos un leve aumento en la tendencia de los valores de NDWI en el estrato *permanente*, y una muy leve disminución en la tendencia de los valores en los estratos *no permanentes* y *otros recubrimientos*. Por otro lado, se evidencia una tendencia a la baja en los valores de NDVI en el estrato *permanente*, y un muy leve aumento en los valores de los estratos *no permanentes* y *otros recubrimientos*. El primero caso, la variación temporal del índice NDWI que presenta un aumento en sus valores (aumento de valores positivos) en su estrato *permanente*, puede relacionarse con la estabilización de las áreas de ocupación de este estrato cuyas características están más asociadas a lagunas y sus corredores, que a cuerpos de agua con reflectancia superficial; por otro lado, los cuerpos de agua *no permanentes* presentan una leve variabilidad en su evolución,

lo que señala una disminución de ecotonos húmedos (zonas de alta humedad o rebalse de lagunar), lo que también se sustenta con el leve aumento de valores de NDWI del estrato *otros recubrimientos* lo que señala su permanencia como zonas de suelos desnudos de baja humedad superficial.

***Las variaciones espaciales en la serie de tiempo total (2009 – 2019) para el sector de La Punta y La Brava*** en ambos índices, señalan la existencia de zonas de muy alta, alta y media variación asociadas al estrato *no permanente*. En el caso de este estrato la variabilidad de sus valores, lo da la propia naturaleza del estrato, que asume periodos de aumento/baja de humedad contenida, movimientos de aguas someras, y aumento/disminución del vigor en la escasa vegetación ribereña. Finalmente, la baja o nula variabilidad corresponde al estrato *otros recubrimientos*, el más estable en valores de índices, ya que describe suelos desnudos cubiertos de sal y de menor humedad superficial contenida.

***En cuanto a las variaciones espaciales para el sector de Peine***, en ambos índices, en general señala que la mayor variabilidad de valores se encuentra en el área de laguna Interna, que es allí donde se verifican valores muy alto, alto y medio en los estratos *permanente* y *no permanente*. En el caso del estrato *permanente*, esta variación podría ser una medida de profundidad y/o aumento de sedimentación o turbiedad de las aguas. En el caso de los estratos *no permanente* la variabilidad se produce por la muy alta variación a un área de inundación cíclica de gran superficie. Finalmente, la baja o nula variabilidad corresponde al estrato más estable en valores de índices, ya que describe suelos desnudos cubiertos de sal estables.

El análisis de comparación de rangos de variación pre y post - operacional por estrato, muestra para el sector La Punta y La Brava en todos los casos las superficies de los cuerpos de agua, se encuentran dentro del rango histórico de valores de NDWI y NDVI, y puede explicar que las variaciones se encuentran dentro de lo esperable para el rango temporal. Para el sector Peine, el análisis por estrato muestra que en todos los casos las superficies de los cuerpos de agua del sector, se encuentran dentro del rango histórico de valores de NDWI y NDVI, y puede explicar que las variaciones se encuentran dentro de lo esperable para el rango temporal.

## 5 BIBLIOGRAFIA

Mann, H.B., Non-parametric tests against trend, *Econometrical*, 13, pp. 245–259, 1945.

Kendall, M.G., Rank correlation methods. 3 ed. Ed. Hafner Publishing Company. New York, 1962.

Muñoz Marín, Carmen María, *et al.* Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del Río Segura. 2008.

Shapiro, S. S.; Wilk, M. B. (1965). «An analysis of variance test for normality (complete samples) ». *Biometrika* 52 (3-4): 591-611. doi:10.1093/biomet/52.3-4.591. JSTOR 2333709 MR 205384.

William H. Kruskal and W. Allen Wallis. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47 (260): 583–621, 1952.

Pearson, K. 1896. Mathematical contributions to the theory of evolution, III. Regression, heredity and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 187:253-318.

Spearman, C. (1987). The proof and measurement of association between two things. *The American journal of psychology*, 100(3/4), 441-471.

Niño, L. (2008). Uso de la función semivariograma y estimación Kriging en el análisis espacial de un indicador entomológico de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Biomédica*, 28(4), 578-586.

Kennedy, R. E., Townsend, P. A., Gross, J. E., Cohen, W. B., Bolstad, P., Wang, Y. Q., & Adams, P. (2009). Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote sensing of environment*, 113(7), 1382-1396.

Cabello, J., Alcaraz-Segura, D., Lourenço, P., & Reyes, A. (2012). Guía para la incorporación de la teledetección al seguimiento de la Red de Parques Nacionales. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

Li, L., Vrieling, A., Skidmore, A., Wang, T., Muñoz, A. R., & Turak, E. (2015). Evaluation of MODIS spectral indices for monitoring hydrological dynamics of a small, seasonally - flooded wetland in southern Spain. *Wetlands*, 35(5), 851-864.